

VŠB – Technická Univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

Návrh úpravy zauhlování  
fluidních kotlů K1 a K2 v Teplárně Zlín

Outline of the Coal Handling  
Fluidized Bed Boilers K1 and K2  
in Zlín Heating Plant

Student:	Bc. Jan Plachý
Vedoucí diplomové práce:	doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Plachý**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh úpravy zauhlování fluidních kotlů K1 a K2 v Teplárně Zlín**  
**Outline of the Coal Handling Fluidized Bed Boilers K1 and K2 in Zlín Heating Plant.**

Zásady pro vypracování:

Vypracujte technický návrh úpravy zauhlování v Teplárně Zlín pro snížení prašnosti a omezení samovznícení skladovaného hnědouhelného paliva.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Popis stávajícího zauhlování v teplárně.
2. Přehled možných koncepcí zauhlování s ohledem na místní poměry.
3. Výpočet a tepelné bilance paliva pro teplárnu.
4. Návrh koncepce zauhlování.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení přínosu rekonstrukce.

Grafické práce:

1. Schéma nového zauhlování.
2. Technický výkres nového zauhlování Teplárny Zlín.

Seznam doporučené odborné literatury:

Černý V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975.  
Kolát P. Přenos tepla a hmoty, skripta VŠB Ostrava 1987.  
ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.  
Dlouhý T. Výpočty kotlů a spalinových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005.

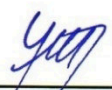
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



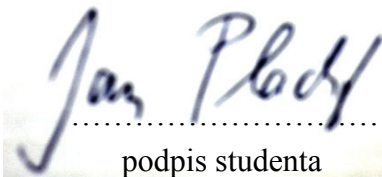
  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 19. 5. 2014

  
.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19. 5. 2014



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jan Plachý

Adresa trvalého pobytu autora práce: Holešov - Všetuly, Sokolská 517, 769 01



## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

PLACHÝ, J. *Návrh úpravy zauhlování fluidních kotlů K1 a K2 v Teplárně Zlín : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 84 s. Vedoucí práce: Čech, B.

Diplomová práce se zabývá návrhem úpravy zauhlování fluidních kotlů K1 a K2 v Teplárně Zlín. V úvodu popisuje jednotlivá zařízení teplárny a jejich parametry. Navazuje na podrobnější popis stávajícího zauhlování. Dále seznamuje s možnými variantami nového zauhlování. V praktické části je řešen výpočet účinnosti kotlů, tepelná bilance paliva pro teplárnu a samotný návrh koncepce nového zauhlování. V závěru je uvedeno zhodnocení z hlediska technického, ekonomického a dopadu na životní prostředí. Schéma nového zauhlování, technický výkres nového zauhlování a další materiály jsou součástí přílohy.

## **ANNOTATION OF MASTER THESIS**

PLACHÝ, J. *Outline of the Coal Handling Fluidized Bed Boilers K1 and K2 in Zlín Heating Plant : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Energetics, 2014, 84 p. Thesis head: Čech, B.

This diploma thesis deals with the proposal of the coal handling fluidized bed boilers K1 and K2 in the heating plant Zlín. The introduction describes the individual devices of the heating plant and their parameters. It shows more detailed description of the existing coal handling. The article introduces the possible variants of the new handling. In the practical part is the calculation of boilers efficiency, heat balance of fuel for heating plant and the entire design concept of a new coal handling. In the conclusion is shown the evaluation of the technical, economic and environmental impact. Diagram of the new coal handling, technical drawing of the new coal handling and other materials are included in the Annex.

# Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....	8
ÚVOD .....	11
1. TECHNICKÝ POPIS ZAŘÍZENÍ TEPLÁRNY .....	12
1.1 Palivo pro kotle .....	12
1.2 Produkce tepla, elektrické energie a upravené vody pro kotle .....	12
1.3 Stanice pro distribuci .....	14
1.4 Rozvody energií .....	15
1.5 Výstupy z kotlů .....	16
1.6 Fluidní kotel K31 – popis .....	16
1.7 Fluidní kotel K32 – popis .....	18
1.8 Blokové schéma Teplárny Zlín .....	22
2. POPIS STÁVAJÍCÍHO ZAUHLOVÁNÍ V TEPLÁRNĚ .....	23
2.1 Doprava uhlí na skládku .....	23
2.2 Skládku uhlí .....	23
2.3 Zauhlování kotlů .....	24
3. PŘEHLED MOŽNÝCH KONCEPCÍ ZAUHLOVÁNÍ .....	27
3.1 Problematika samovznícení paliva .....	27
3.2 Přehled koncepcí zauhlování .....	28
3.2.1 Odvodnění skládky .....	28
3.2.2 Zastřešení skládky .....	29
3.2.3 Kombinace odvodnění a zastřešení .....	30
3.2.4 Hlubinná vykládka a sklad paliva .....	30
3.3 Volba koncepce zauhlování .....	31
4. VÝPOČET A TEPELNÁ BILANCE PALIVA PRO TEPLÁRNU .....	32
4.1 Stechiometrie spalování .....	32
4.2 Odsíření spalin kotle K31 .....	37
4.3 Ztráty kotle K31 při odsíření .....	45
4.4 Stanovení účinnosti kotle K31 nepřímou metodou při odsíření .....	51
4.5 Porovnání s účinností uvedenou v pasportech kotle K31 .....	51
4.6 Tabulka vypočtených hodnot kotle K31 .....	51
4.7 Odsíření spalin kotle K32 .....	52
4.8 Ztráty kotle K32 při odsíření .....	60
4.9 Stanovení účinnosti kotle K32 nepřímou metodou při odsíření .....	65
4.10 Porovnání s účinností uvedenou v pasportech kotle K32 .....	66
4.11 Tabulka vypočtených hodnot kotle K32 .....	66
4.12 Tepelná bilance paliva pro teplárnu .....	66
5. NÁVRH KONCEPCE ZAUHLOVÁNÍ .....	71
5.1 Hlubinná vykládka paliva .....	71
5.1.1 Popis provozu .....	71
5.1.2 Předpokládaná kapacita provozu .....	72
5.1.3 Popis provozu na železniční vlečce .....	72
5.1.4 Popis technologie provozu .....	73
5.2 Sklad paliva .....	75
5.2.1 Popis konstrukce .....	75
5.2.2 Popis technologie provozu .....	75
5.2.3 Kapacita provozu .....	77
5.3 Realizace celé přestavby .....	78

6.	TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PŘÍNOSU REKONSTRUKCE	79
6.1	Technické hledisko	79
6.2	Ekonomické hledisko	79
7.	ZÁVĚR	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83
	SEZNAM PŘÍLOH	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	84

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<i>Označení</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka SI</i>
A	popelovina	[1]
C	uhlík	[1]
C	nedopal	[%]
Ca/S	poměr	[mol.mol <sup>-1</sup> ]
CaCO <sub>3</sub>	čistota uhličitanu vápenatého	[kg.kg <sup>-1</sup> ]
CaO	oxid vápenatý	[1]
C <sub>p</sub>	měrná tepelná kapacita	[J.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]
C <sub>so2</sub>	množství oxidu siřičitého po odsíření	[kg.m <sup>-3</sup> <sub>N</sub> ]
ČD	České dráhy	[1]
ČU	černé uhlí	[1]
D <sub>j</sub>	jmenovitý výkon kotle	[W]
F.x	pásový dopravník - flexowell	[1]
H	vodík	[1]
H <sup>0</sup>	slučovací teplo reakcí	[J.mol <sup>-1</sup> ]
HU	hnědé uhlí	[1]
CHÚV	chemická úprava vody	[1]
Kxx	interní značení kotlů	[1]
M	molární hmotnost	[kg.mol <sup>-1</sup> ]
N <sub>2</sub>	dusík	[1]
NT	nízko-tlak	[1]
O <sub>2</sub>	kyslík	[1]
O <sub>i</sub>	objem složky ve spalínách	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> .kg <sup>-1</sup> ]
P <sub>p-t</sub>	tepelný příkon	[W]
Q <sub>i</sub>	výhřevnost	[J.kg <sup>-1</sup> ]
S	síra	[1]
T	transformátor	[1]
T.2	stávající pásový dopravník	[1]
TGx	turbogenerátor-označení	[1]
TS	technické služby	[1]
TTO	těžký topný olej	[1]
TZL	tuhé znečišťující látky	[1]
V.x	pásový dopravník	[1]
VAK	vody a kanalizace	[1]
VT	vysoko-tlak	[1]
VV	vyhrnovací vůz	[1]
W	voda	[1]
X	zachycení	[%]

ZP	zemní plyn	[1]
ŽP	životní prostředí	[1]
h	hořlavina	[1]
i	entalpie	[J.kg <sup>-1</sup> ]
ṁ	hmotový tok	[kg.s <sup>-1</sup> ]
m <sub>sm</sub>	molární zastoupení síry v palivu	[mol.kg <sup>-1</sup> ]
o2	zrnitost – ořech 2	[1]
p	tlak	[Pa]
q <sub>l,K</sub>	zdánlivá změna výhřevnosti	[J.kg <sup>-1</sup> ]
t	teplota	[°C]

### řecká písmena

α	přebytek vzduchu	[1]
Δ	rozdíl	[1]
ζ	ztráta	[%]
η	účinnost	[%]
μ	poměr toku vápence/toku paliva	[1]
τ	počet provozních hodin	[s.rok <sup>-1</sup> ]
υ	zvětšení obejmu vlivem vlhkosti	[1]
ω	koncentrace složky ve spalínách	[%]

### indexy

abs	absorbované
C,K	ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
CaCO <sub>3</sub>	uhličitan vápenatý
cel	celkové
C <sub>lp</sub> K	ztráta hořlavinou v popelu
CO,K	ztráta hořlavinou ve spalínách
C <sub>p</sub> K	ztráta hořlavinou v popílku
el	elektrická energie
f,K	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
f <sub>p</sub> K	ztráta fyzickým teplem popela
f <sub>pop</sub> K	ztráta fyzickým teplem popílku
f <sub>v</sub>	fluidní vrstva
H <sub>2</sub> O	vodní pára ve spalínách
K	hodnoty po odsíření
K,K	ztráta komínová
lp	ložový popel
min	minimální (teoretický) objem
N <sub>2</sub>	dusík

NV	napájecí voda
p	pára
pal	palivo
PO	měrné teplo popílku
pop	popílek
PS	skutečné suché spaliny
PS,k	množství spalin nástřel
PV	skutečné vlhké spaliny
r	surový stav
s	odsíření
SK	skutečný
SO <sub>2</sub>	oxid siřičitý
spal	spaliny
SV	ztráta sdílením tepla do okolí
t	teplo
t-cel	celkové teplo přivedené v palivu
t-el	teplo na výrobu elektrické energie
t-roz	teplo dodané do rozvodů
VS	suchý vzduch skutečný
VV	vlhký vzduch skutečný
ztr	ztráta

# ÚVOD

V diplomové práci se zabývám návrhem úpravy zauhlování fluidních kotlů K1 a K2 v Teplárně Zlín. Navrhuji řešení, které by snížilo prašnost a omezilo samovznícení skládkového hnědouhelného paliva. Nabízí se více variant, avšak nejdůležitějším kritériem výběru je splnění požadavků kladených na nové zauhlování v Teplárně Zlín.

Při návrhu nového zauhlování mám na výběr z více možných konstrukčních řešení. U každé varianty uvádím klady a zápory. Požadavky na úpravu zauhlování jsou dosti vysoké. Vyhodnocením těchto hledisek docházím k jedinému možnému řešení, které musí všechny požadavky uvedené výše spolehlivě zajistit.

V dnešní době je kladen veliký důraz na životní prostředí a proto je cílem této práce zmírnění dopadu skládkového paliva na okolí Teplárny Zlín. V neposlední řadě se musí brát ohledy na obyvatele okolí teplárny, i oni mají své právo na lepší životní prostředí.

# 1. TECHNICKÝ POPIS ZAŘÍZENÍ TEPLÁRNY

Zpracováno dle [4], [6].

## 1.1 Palivo pro kotle

### *Skládka uhlí – obecně*

kapacita na skládce:

pro HU	10 000 t (kompost pro energetické využití max. 100 t)
pro ČU	3 000 t

### *Zařízení pro dávkování biomasy pro K31*

Samostatná trasa dávkování dřevní štěpky do kotle o výkonu max. 5 t.h<sup>-1</sup> se zásobníkem 1 000 m<sup>3</sup>.

### *Spalování bioplynu*

Bioplyn je přiveden plynovodem z komunální skládky Suchý důl. Spalování je prováděno v K 32, kde je jeden z najížděcích plynových hořáků uzpůsoben tomuto spalování.

### *Vlečka*

Koleje jsou v pronájmu. Licenci na provozování má Teplárna Zlín. Vlečka slouží k přísunu uhlí, vápence, chemikálií pro teplárnu a dále zajišťuje služby u zákazníků v areálu Svit z nádraží ČD Zlín střed. Zhruba 90 % služeb je pro teplárnu. Oddělení vlečky disponuje dvěma lokomotivami.

## 1.2 Produkce tepla, elektrické energie a upravené vody pro kotle

### *Výroba tepla*

Výroba tepla je realizovaná dvěma fluidními kotli K 31, K 32, které tvoří základní zatížení provozu výroby. V zimním a přechodovém období jsou v provozu oba fluidní bloky, v letním období jeden blok z důvodu nízké spotřeby tepla u zákazníků. Kromě fluidních kotlů K 31, K 32 jsou využívány v tepelných špičkách K 21, 22 případně K 12, 13.



K 12, 13 jsou využívány málo, většinou pouze v době tzv. celozávodní dovolené v areálu Svit. V tuto dobu jsou odstavena hlavní výrobní zařízení včetně rozvodů a provádějí se na těchto zařízeních opravy, které jinak nelze provádět v průběhu roku. Dále k výrobě tepla je k dispozici výtopna Kocanda, která sestává ze 4 kotlů Slatina.

Parametry kotlů:

uhlí	K 31	výkon	170 t.h <sup>-1</sup>	pára 9,6 MPa	teplota 540 °C
uhlí	K 32	výkon	125 t.h <sup>-1</sup>	pára 9,6 MPa	teplota 540 °C
ZP	K 21, 22	výkon	80 t.h <sup>-1</sup>	pára 1,3 MPa	teplota 250 °C
ZP	K 12, 13	výkon	25 t.h <sup>-1</sup>	pára 1,3 MPa	teplota 220 °C
ZP	Kocanda (4 kotle)	2,5 MWt	horkovodní		
TTO	K 10	58 MWt	horkovodní		

Výtopna Kocanda, K 21, 22 jsou provozovány kromě vykrytí tepelných špiček i jako záložní kotle pro případ výpadku některého z fluidních kotlů. Kotel K 10 je provozuschopný, slouží jako studená záloha, 10 let nebyl v provozu. Má speciální režim možnosti provozování, který je dohodnut s Krajským úřadem – odborem ŽP. Najíždění by proběhlo v případě největší možné havárie zařízení v teplárně nebo při přerušení dodávek ZP např. vlivem teroristického útoku.

### ***Výroba elektrické energie***

K výrobě slouží TG 31, TG 32, které jsou zapojeny do bloku s K 31, K 32. Dále jsou k výrobě využívány TG I, TG VI, které pracují s admisní párou 0,4 MPa. Tyto turbíny jsou provozovány v letním období při provozu K 31 z důvodu udržení minimální výkonu K 31. Dále je v majetku TG V, která pracuje s admisní párou 3,5 MPa a dříve sloužila na výrobu elektrické energie ze starých uhelných kotlů. V současné době je turbogenerátor určen k prodeji.

Parametry turbín:

TG 31	25 MW odběrová	(odběr 1,3 a 0,4 MPa) s koncovým výměníkem			
TG 32	33 MW kondenzační odběrová	(odběr 2,4; 1,3 a 0,4 MPa)			
TG I	5 MW kondenzační	admisní pára 0,4 MPa	hltnost 45 t.h <sup>-1</sup>		
TG VI	6 MW kondenzační	admisní pára 0,4 MPa	hltnost 50 t.h <sup>-1</sup>		

Chlazení kondenzátoru je zajištěno chladicí věží IT 54. Max. průtok chlad. věží je 4 800 m<sup>3</sup>/hod.,  $\Delta t = 10,8$  °C. Doplnovací voda je filtrována přes filtr. Chladicí okruh vody je dále chemicky upravován.

### ***Výroba upravené vody pro doplňování – CHÚV***

Zdrojem vody je řeka Dřevnice. K výrobě demivody z čiřené vody slouží 2 demilinky, každá o výkonu 60 t.h<sup>-1</sup>. Katexové a anexové filtry pracují s protiproudovým systémem toku médií. Další součástí CHÚV je linka na úpravu kondenzátu s K filtry, každý s výkonem 250 t/h. Směs upravených kondenzátů a demivody je v konečné fázi upravována na směsných filtrech s max. průtokem každého 250 t.h<sup>-1</sup>. Dále je součástí CHÚV neutralizační jímka a kalolis k separaci tuhých částí z alkalického čiření a nádrže na chemikálie. Odpadní vody z CHÚV jsou svedeny do neutralizační jímky a dále do neveřejné kanalizace.

### ***Tepelná úprava vody***

Slouží k tepelné úpravě napájecí vody pro K 32. Součástí je předhřev, odplynění demisměsi z CHÚV a dávkování čpavku do napájecí vody K32 . Jsou zde umístěny napáječky pro K 32.

## **1.3 Stanice pro distribuci**

### ***Předávací stanice tepla***

Je tvořena dvěma hlavními rozdělovači páry 1,3 MPa a 0,4 MPa, do kterých jsou zaústěny odběry z turbín redukčních stanic kotlů K 21, 22, 12, 13. Dále odtud vycházejí páteřní rozvody páry do areálu Svít a do centrální části města a do výměňkové stanice.

### ***Výměňková stanice***

Slouží k předání tepla z páry do horké vody. Výměňková stanice je tvořena 8 výměníky tepla o celkovém tepelném výkonu 100 MWt . Je rozdělena na 2 tlaková pásma. NT systém slouží k vytápění části města v údolí Zlína, VT systém k vytápění sídliště Jižních svahů.

### ***Centrální kompresorová stanice***

Je zdrojem stlačeného vzduchu jednak pro vlastní spotřebu teplárny a dále zásobuje stlačeným vzduchem 0,6 MPa a 1,2 MPa celý areál Svit. Na kompresorovně je celkem 13 kompresorů.

## **1.4 Rozvody energií**

### ***Elektrina***

Teplárna je vlastníkem rozvodů 6 kV, 22 kV v areálu Svit včetně trafostanic. Prostřednictvím rozvodů jsou realizovány dodávky elektrické energie zákazníkům v areálu Svit. Propojení ze sítě E.ON je prostřednictvím vedení 110 kV a dvěma transformátory T 114, T 115 6 /110 kV. Záložní spojení je na napěťové hladině 22 kV.

### ***Horká voda***

Délka cca 50 km. Horkovodní síť je tvořena 3 hlavními větvemi: Tř. T. Bati, Nábřeží, Jižní svahy. První dvě jsou nízkotlaké (1,2 MPa), větev Jižní svahy je vysokotlaká (1,8 MPa).

### ***Pára***

Zásobují centrální části města parou 0,4 MPa, areál Svit 0,4 MPa pro vytápění budov. Technologická pára je zajišťována rozvody páry o tlaku 1,3 MPa a 2,4 MPa (MITAS). Celková délka rozvodů páry je cca 50 km. Kondenzáty jsou vedeny do teplárny buď samospádem nebo jsou čerpány z jímek v areálu Svit.

### ***Stlačený vzduch***

Dvě úrovně tlaků 1,2 MPa a 0,6 MPa pro zajištění stlačeného vzduchu u zákazníků a částečně vlastní spotřeby teplárny.

### ***Zemní plyn***

Slouží k zajištění spotřeby u zákazníků v areálu Svit. Všechny rozvody jsou umístěny z velké většiny v energetických kanálech pod povrchem země.

### ***Pitná voda***

Slouží k zajištění pitné vody pro zákazníky v areálu Svit. Pitná voda je pro zákazníky nakupována z VAK Zlín.

## **1.5 Výstupy z kotlů**

### ***Čištění spalín***

K zachycení TZL z fluidních kotlů slouží látkové filtry Elkem. Každý fluidní kotel má svůj filtr. Filtr má kapacitu  $210\,000\text{ m}^3_{\text{n}}\cdot\text{h}^{-1}$  vzdušiny.

### ***Míchací centrum popelů***

Je tvořeno dvěma silami a má  $1\,000\text{ m}^3$ . Pod každým silem je míchací zařízení pro tvorbu směsi popela a vody. Do sil jsou zaústěny pneumatické dopravní cesty obou fluidních kotlů.

### ***Skládka popelů Mladcová***

Slouží pro ukládání popelů z teplárny. V současné době je zakonzervovaná a popely jsou odváženy na skládku Suchý důl na základě smlouvy s TS Zlín (ložový popel). Ostatní popely odváží na základě smlouvy OKD HBZS a.s Ostrava.

### ***Komíny***

Komín	140 m	pro K 32, K 12
Komín	120 m	pro K 31
Komín	60 m	pro K 21, 22
Komín	25 m	pro K 13

## **1.6 Fluidní kotel K31 – popis**

Kotel je věžového typu s přirozenou cirkulací a fluidním ohništěm. Zhotoven z membránových stěn.

V prvním tahu kotle je výparník z membránových stěn. Spodní část tvoří spalovací komora s fluidním ohništěm, teplo sálá do volného prostoru nahoru kde se nachází

konvekční výhřevné plochy. Dno spalovací komory a vzduchová skříň vzniká vyhnutím zadní membránové stěny výparníku do tvaru „U“. Výparník je opatřen otrněním a žáruvzdorným omazem v oblasti fluidní vrstvy a sálavého prostoru až nad přívod sekundárního vzduchu. Teplota fluidní vrstvy je udržována na hodnotě cca 850 °C.

Konvekční části teplosměnných ploch zapojeny do okruhu výparníku, přehříváku a výstupního ohříváku vody.

Ve druhém tahu nad ohřívákem vzduchu je vstupní díl ohříváku vody. Rychlost spalin se pohybuje cca 5 m.s<sup>-1</sup>.

Buben je umístěn pod stropem kotelny. Výparník se skládá ze dvou samostatných okruhů, ke každému jsou samostatné zavodňovací a rozváděcí trubky. Pomocí převáděcích trubek se parovodní směs dostává do bubnu. Odtud jde sytá pára do dvou dílů přehříváků. Teplota páry se reguluje vstřikem z napájecí vody.

V prvním tahu se spaliny vychladí na výhřevných plochách cca 470 °C. V horní části jsou spaliny vedeny do dvou cyklónů, které se nachází mezi tahy kotle. Spádovými trubkami se vrací odloučený popel z cyklónů zpět do fluidní vrstvy, přes popelové fluidní uzávěry (sifóny). Z cyklónů spaliny pokračují do druhého tahu kotle, kde předávají část tepla ohříváku vody a trubkovému ohříváku vzduchu, teplota spalin za kotlem se pohybuje cca 160 °C. Kotel má dva okruhy vnitřní přípravy paliva. Jeden z nich je dimenzován na 70 % výkonu kotle při spalování nejhoršího paliva.

Jako palivo se používá hnědé uhlí, které je dopravováno a upravováno dvěma cestami. Řetězové dopravníky odebírají uhlí ze dvou bunkrů a dopravují ho do dvou drtičů. Pod drtiči jsou dva šikmé řetězové dopravníky, zde se míchá uhlí s aditivem, jde do svodek popela za sifóny a následně do spalovací komory. Drcený vápenec je dávkován mechanicky ze dvou zásobníků do příčných dopravníků drceného paliva a před samotným vstupem do spalovací komory, dochází k mísení se surovým uhlím. Dva ventilátory těsnícího vzduchu doplňují zařízení zauhlování.

Ve dně jsou umístěny dvě vypouštěcí potrubí popela, které vedou do chladících šneků a mají za úkol zajišťovat hladinu fluidní vrstvy na požadované výšce. Třídění popela se provádí na sítích. Částice nad 10 mm je odváděna ven, částice pod 10 mm putuje do

provozního nebo vnějšího zásobníku popela. Cirkulační okruhy popel přes cyklóny mají vypouštěcí potrubí. Popel putuje z těchto míst do provozního mezizásobníku popela u cyklónů. Část popela se vrací zpět do fluidní vrstvy, zbytek popela se vychladí v chladících šnečích s následným dopravením do vnějšího zásobníku ložového popela. Na výstupu z kotle jsou spaliny čištěny v prvním stupni mechanickými (cyklónovými) odlučovači a druhý stupeň čištění je látkový odlučovač (filtr). Zachycený popílek v odprašovacím zařízení za kotlem se dopravuje mimo kotelnu do vnějšího zásobníku úletového popela. V případě potřeby je možno popílek vracet zpět do fluidní vrstvy.

Čištění výhřevných ploch se provádí dlouhými parními ofukovači v druhém tahu kotle.

Dopravu primárního a sekundárního vzduchu do kotle zajišťují dva radiální vzduchové ventilátory. Sání vzduchu je umístěno uvnitř a vně kotelny. Předehřev vzduchu zajišťují parní ohříváky. Dále je vzduch ohříván spaliny z kotle v trubkovém ohříváku vzduchu. Ohřátý primární vzduch je veden do vzduchové skříně pod dno fluidní vrstvy a sekundární vzduch do dvou úrovní nad fluidním roštem.

Tři vysokotlaké vzduchové ventilátory slouží k dopravě stlačeného vzduchu do dvou sifónů (jeden je záloha) a dva vysokotlaké vzduchové ventilátory pro dopravu vzduchu do zauhlování kotle (jeden je záloha).

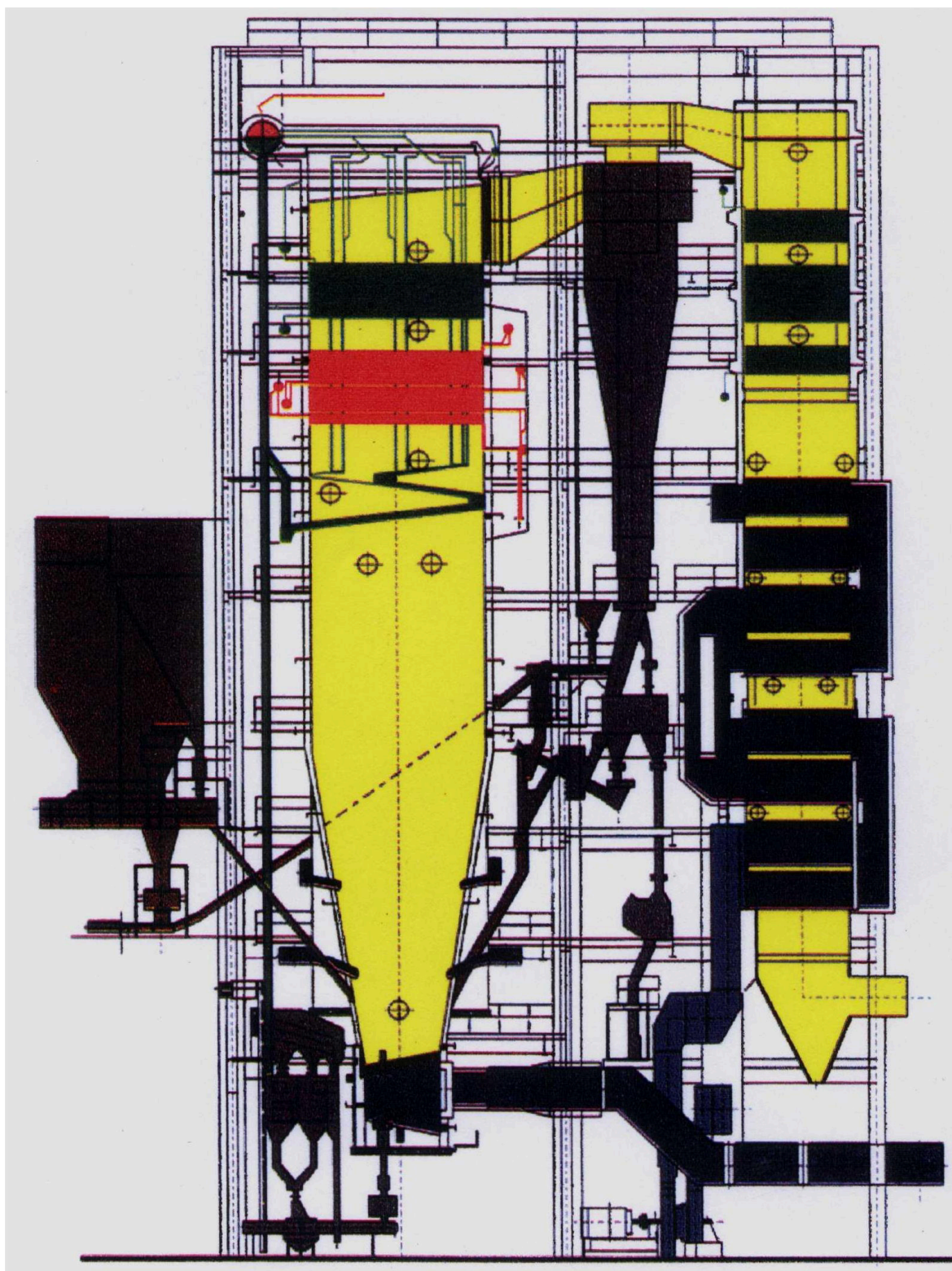
Kotel se najíždí plynovými hořáky. Recirkulace čistých spalin z výtlaku kouřového ventilátoru do primárního vzduchu slouží ke zlepšení regulace.

Dálkové měření kotle umožňuje ovládání a kontrolu provozu v automatické regulaci. Schéma kotle viz. obrázek 1. níže.

## **1.7 Fluidní kotel K32 – popis**

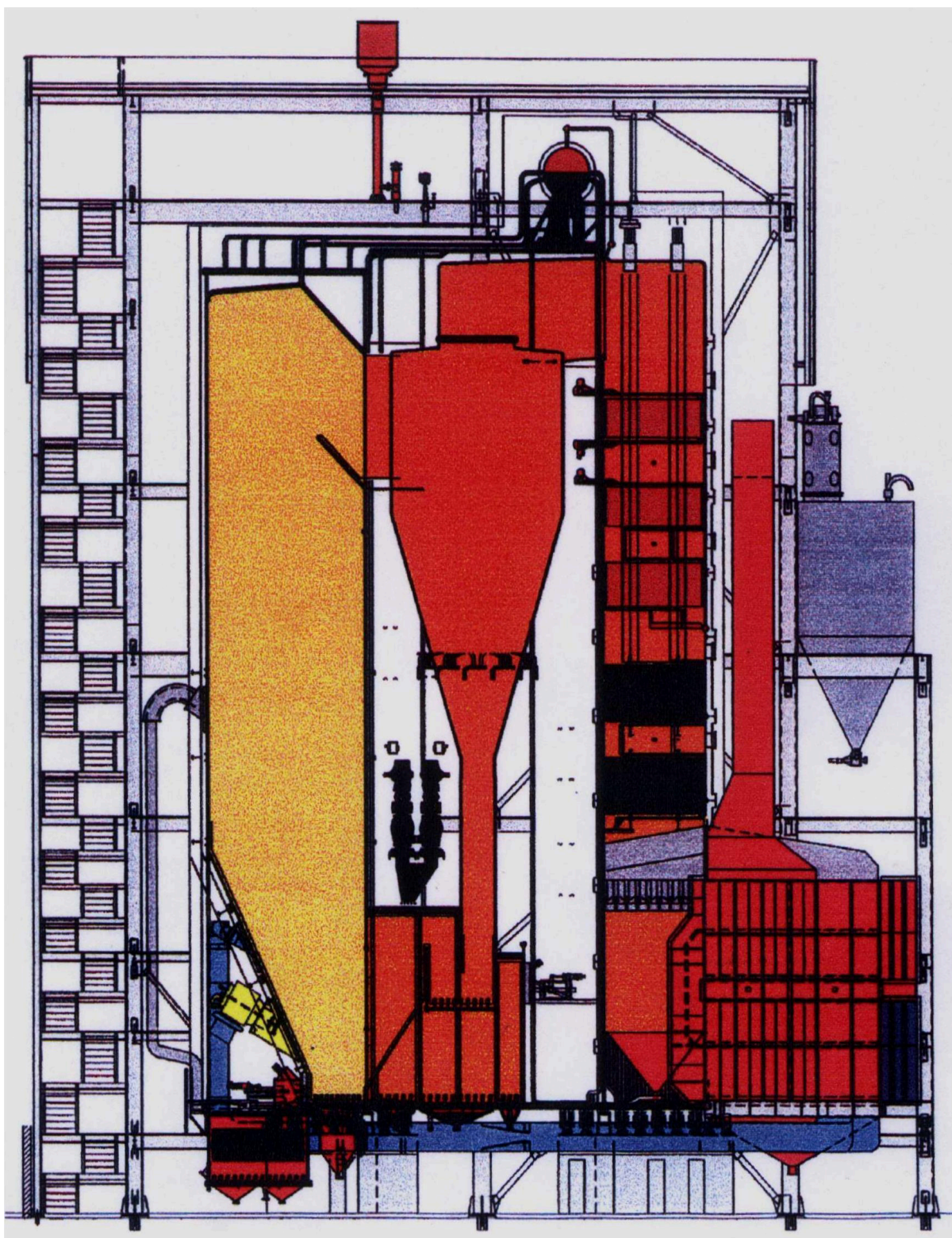
Kotel je věžového typu s přirozenou cirkulací a fluidním ohništěm. Zhotoven z membránových stěn. Kotel je umístěn na betonovém základu, dilatace je směrem vzhůru. Přední stěna ohniště je zešikmená, jsou v ní zaústěny zapalovací hořáky a přívody sekundárního vzduchu. Teplosměnná plocha výparníku je tvořena stěnami spalovací

komory. Ve spodní části fluidního ohniště je odváděn ložový popel přes regulační ventil zpět do fluidní vrstvy (vrácení jemné frakce zpět do kotle). Po opuštění spalovací komory jdou spaliny do horkého cyklónu, kde dochází k odloučení jemné frakce a odtud proudí do druhého tahu kotle, který tvoří membránovou stěnu přehříváku prvního a tří svazků konvekčních přehříváků. Druhý tah je opatřen dvoudílným ohřívákem vody. Výměník tepla cirkulujícího popílku pod cyklónem zajišťuje regulaci výkonu kotle a teploty ohniště. Trubkový ohřívák vzduchu se nachází na výstupu spalin z druhého tahu kotle. Aditivum (vápenec) se dávkuje do fluidní vrstvy. Schéma kotle viz. obrázek 2. níže.



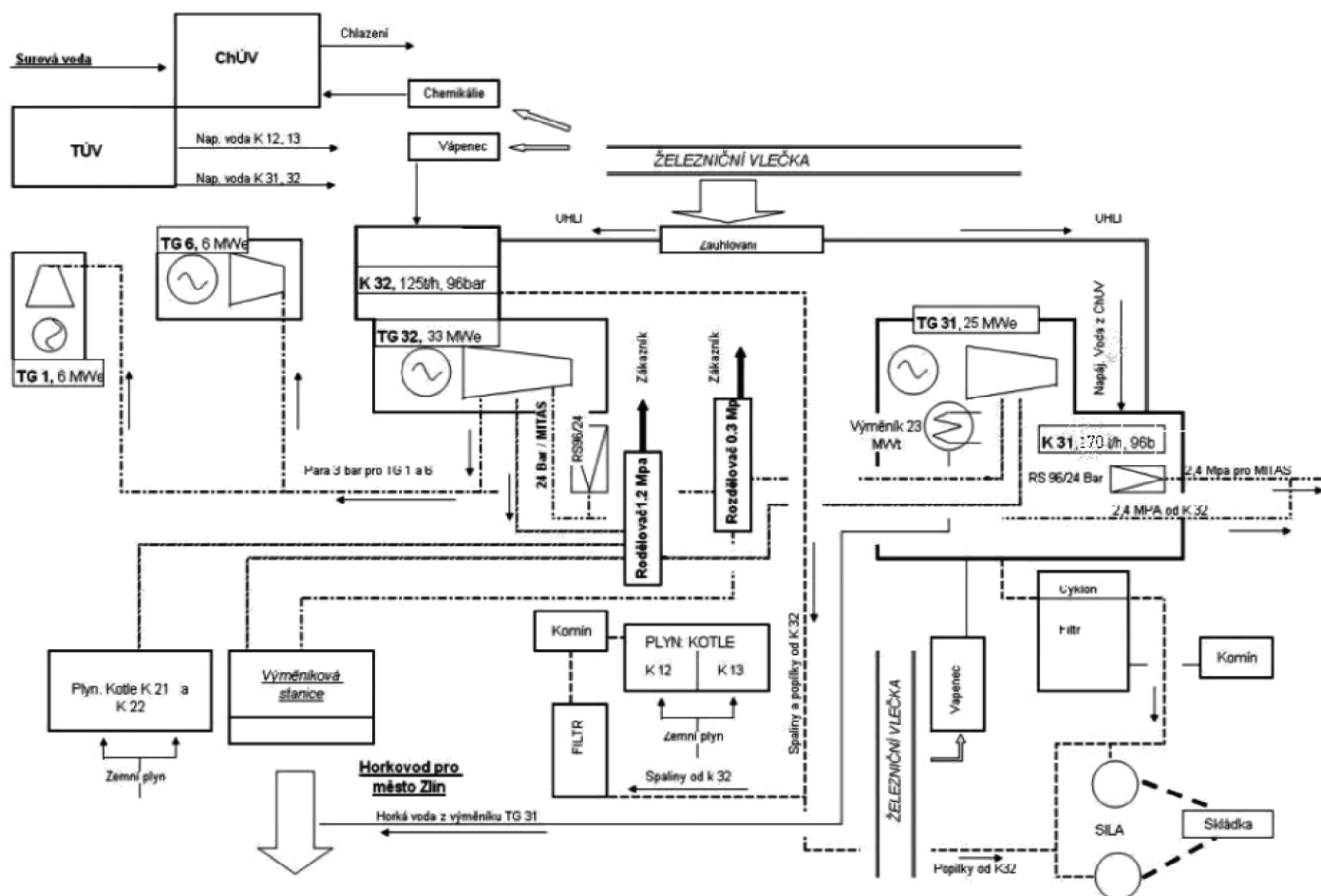
*Obr. 1. Schéma kotle K31 [4]*





*Obr. 2. Schéma kotle K32 [4]*

## 1.8 Blokové schéma Teplárny Zlín



Obr. 3. Blokové schéma teplárny [9]

## **2. POPIS STÁVAJÍCÍHO ZAUHLOVÁNÍ V TEPLárnĚ**

Zpracováno dle [6].

### **2.1 Doprava uhlí na skládku**

Vlak hnědého uhlí přiváží dvě lokomotivy společnosti Cargo do stanice Zlín střed, většinou na druhou nebo čtvrtou kolej. Souprava je tvořena čtyřnápravovými vozy (uhláky), které jsou státní (RIV) nebo pronajaté (P) společností Expol. Souprava RIV má 22 vozů, souprava Expol má 25 až 30 vozů. Hmotnost prázdného vagónu cca 22 t, náklad cca 50 až 55 t.

Pracovníci železniční vlečky odeberou ze soupravy sedm vagónů a přistaví je pod jeřábovou dráhu k vykládce. Portálový jeřáb vyloží maximálně pět vozů bez nutnosti manipulace s vagóny (potahování). Po vyložení se zbylé dva vozy, které se nachází mimo jeřábovou dráhu potáhnou pod jeřáb. Vyložení jednoho vozu hnědého uhlí cca 30 až 40 min, černé uhlí cca 60 min. Po vykládce je potřeba ruční dočištění vagónů (lopaty).

Obsluha portálového jeřábu má dvě možnosti složení paliva. První je přímo na skládku paliva a druhá do násypky, ze které je dávkováno na dopravní pás.

Celkový počet pracovníků ve vnějším zauhlování je pět. Patří sem: strojvedoucí, posunovač, obsluha jeřábu a dva dočišťovači vagónů.

### **2.2 Skládka uhlí**

Nynější skládka paliva se nachází mezi kotli K31 a K32. Uhlí je volně loženo na podkladové vrstvě. Skládka není odvodněná, zastřešená. Při vykládání paliva dochází ke značnému prášení. V letních měsících mají problémy se zahoříváním paliva na skládce, pravděpodobná příčina jsou vodní srážky, které se drží na podkladové vrstvě pod uhlím a následným odpařováním vody dochází k intenzivnímu proudění vodní páry, tím se přisává vzduch a dojde k zahoření paliva. Aby se předcházelo zahoření paliva, jezdí po ní buldozer a neustálým udusáváním zabraňuje přístupu vzduchu. Obrázky skládky viz. níže.

### ***Kapacita skládky:***

pro HU	<b>10 000 t</b> (kompost pro energetické využití max. 100 t)
pro ČU	<b>3 000 t</b>

### ***Plocha skládky:***

K ploše skládky paliva se mi podařilo sehnat pouze katastrální mapu (jiná dokumentace neexistuje) v měřítku 1:1000. Na mapě je vyznačená (červený o) jako pozemek 1255/II a výměry činí 13 895 m<sup>2</sup>. Skládka ovšem nezabírá celou výměru, pouze její část. Přesněji se jedná o plochu 117 x 24 = **2 808 m<sup>2</sup>** a výška opěrné zdi je **2,4 m**. Obrázek katastrální mapy viz. níže.

## **2.3 Zauhlování kotlů**

Pokud je teplota – 5 °C a nižší, provozují se kotle na 100% jmenovitého výkonu. Spotřeba paliva se bude pohybovat cca 1200 t/den. To znamená, že se bude zauhlovat téměř nepřetržitě. Při těchto klimatických podmínkách se kotel K31 zauhluje jednou za směnu a kotel K32 dvakrát za směnu.

Cesta uhlí ze skládky do kotle je následující:

- Portálový jeřáb nabere uhlí ze skládky
- Součástí jeřábu (jeho konstrukce) je násypka na dopravní pás
- Podle potřeby zauhlování kotle se pás pohybuje doleva nebo doprava
- pro kotel K31 je doprava uhlí pomocí šikmého pásu do mezizásobníku paliva
- pro kotel K32 je doprava uhlí pomocí výtahu (korečkový dopravník) do mezizásobníku paliva
- odtud je palivo zavedeno do drtiče uhlí
- dále se přidá aditivum (drcený vápenec), dávkování přímo do uhlí
- uhlí + aditivum jde přímo do fluidního ohniště

Dopravní výkon pásu je max. **100 t/h**. Při zauhlování kotle K32 je využito pouze 80 % dopravního výkonu, omezeno dopravním množstvím výtahu (korečkového dopravníku).





*Obr. 4. Násypka na dopravní pás [4]*



*Obr. 5. Pohled na skládku z kotle K32 [4]*





### **3. PŘEHLED MOŽNÝCH KONCEPCÍ ZAUHLOVÁNÍ S OHLEDEM NA MÍSTNÍ POMĚRY**

#### **3.1 Problematika samovznícení paliva**

Zpracováno dle [6].

U černého a hnědého uhlí za specifických podmínek dochází k samovznícení paliva.

Faktory ovlivňující samovznícení paliva:

- reakce paliva s kyslíkem
- obsah vody
- chemické složení paliva
- klimatické podmínky

Abychom předešli samovznícení paliva, jsou zavedeny v Teplárně Zlín následující kontroly a opatření:

- na skládku ukládáme pouze uhlí, které nejeví známky samovznícení (kouř)
- do tělesa skládky se nesmí zasypávat např. zapařený kompost (biopalivo), který by svojí vyšší teplotou mohl iniciovat vznik ohniska samovznícení
- uhlí se nesmí vykládat do míst, kde probíhá likvidace ohnisek samovznícení, pokud dojde k samovznícení paliva, vykládka je zastavena
- po vykládce je uhlí hutněno buldozerem, aby se minimalizoval přístup vzduchu do skládky paliva
- každý den mezi 6 a 8 hod. ranní je provedena vizuální kontrola skládky, v případě nestandardních jevů (tmavší místa, rychlé vysychání po dešti, tání sněhu, vodní pára, kouř), dále se provede měření teploty bezdotykovým teploměrem po obvodu uhelné hromady a vyhodnocení kontroly
- zjistí-li se nestandardní chování při vizuální kontrole (vyšší teplota určitého místa, případné zvyšování teploty) je povinnost neprodleně informovat vedoucího uhelné skládky, vedoucí si ihned vyžádá termosnímek povrchu celé skládky s vyhodnocením stavu
- termosnímek povrchu celé skládky se musí nejméně jedenkrát týdně provádět, bez ohledu na vyžádání vedoucím uhelného hospodářství, vytvořená zpráva se zašle

vedoucímu uhelného hospodářství v elektronické podobě, ten má za úkol zprávy archivovat

- výstupní zprávu z termosnímků má povinnost vedoucí uhelného hospodářství konzultovat s výrobním ředitelem s cílem minimalizovat možný vznik samovznícení paliva
- při likvidaci ohnisek samovznícení se postupuje podle havarijního plánu v případě samovznícení paliva na skládce

Výše uvedené kontroly a opatření by nová koncepce zauhlování měla omezit nebo v lepším případě úplně odstranit.

### **3.2 Přehled koncepcí zauhlování**

Možnosti, které by řešili problém se zahořením paliva na skládce se dají vyřešit více způsoby. Nyní se pokusím navrhnout pár možných variant. U každé z nich uvedu klady a zápory, podle kterých se rozhodnu pro jednu možnost.

Varianty nového zauhlování:

- odvodnění skládky
- zastřešení skládky
- kombinace odvodnění a zastřešení
- hlubinná vykládka a sklad paliva

#### **3.2.1 Odvodnění skládky**

Jako první řešení se nabízí odvodnění skládky, respektive zabránění vzniku míst, kde se drží voda (kaluže) pod vrstvou skladovaného uhlí. V těchto místech, je zvýšené riziko zahoření paliva.

Realizace není příliš složitá. Podkladová plocha skládky musí zajistit nepropust a zároveň schopnost svést vodu do jednoho nebo více míst. V místech, kde se voda shromažďuje se vytvoří malé betonové šachty a odtud se voda vyčerpá do čistírny vod. Celá přestavba se dá provést za chodu. Skládka uhlí se vyprázdní na minimální



požadované zásoby paliva. Ložené uhlí přesuneme na jeden konec skládky a na druhé straně začneme s potřebnými úpravami povrchu.

klady:

- nízké náklady na přestavbu
- rychlá realizace
- bez nutnosti odstavení provozu

zápory:

- neřeší snížení prašnosti
- nejistý výsledek proti samovznícení

### **3.2.2 Zastřešení skládky**

Další možnost je zabránění dopadu atmosférických srážek na skládku paliva. Tím by se vyřešil problém se vznikem kaluží a následným zahořením paliva.

Konstrukce střechy je složitá, jelikož vykládku paliva zajišťuje portálový jeřáb, který se musí pohybovat po celé délce skládky bez omezení např. nosníky střechy. Zjednodušeně řečeno, střecha musí být ukotvena na koncích skládky, což není z konstrukčního hlediska jednoduché. Dešťová voda se svede do areálové kanalizace. Při stavbě zastřešení nutnost omezení provozu.

klady:

- nízké náklady na přestavbu
- poměrně rychlá realizace

zápory:

- neřeší snížení prašnosti
- nutné omezení provozu
- nejistý výsledek proti samovznícení

### 3.2.3 Kombinace odvodnění a zastřešení

Skloubení dvou variant umožní zabránění dopadu atmosférických srážek a zároveň případnému odvodu vody ze skládky. Částečné snížení prašnosti docílíme instalací automatického postřikovacího systému skládky, umístíme ho pod zastřešení skládky, který bude aktivní během manipulace s uhlím na skládce a zároveň bude sloužit jako protipožární bezpečnostní systém skládky paliva. Pro eliminaci prašnosti by sloužil systém tlakového mlžení (vodní + vzduchové trysky). Otázka je, jakého by se dosáhlo účinku snížení prašnosti, či zda by byl dostačující.

Realizace by byla náročnější. V první etapě se jedná o samotné odvodnění skládky. V druhé etapě jde o výstavbu zastřešení a dodatečnou instalaci automatického postřikového systému. Postřikový systém by se rozdělil na jednotlivé sekce, kdyby došlo k zahoření paliva v jednom místě nebo pro případnou manipulaci s uhlím, aby se nemusela kropit celá skládka paliva.

klady:

- poměrně rychlá realizace
- částečně řeší snížení prašnosti
- částečné zabránění samovznícení

zápory:

- vyšší náklady na přestavbu
- omezení provozu

### 3.2.4 Hlubinná vykládka a sklad paliva

Jedná se o kompletní přestavbu, která by vyžadovala delší omezení. Vybudování hlubinné vykládky paliva zajistí rychlejší vysypání uhlí z vagónů (typ Falls). Vykládka je celá zastřešená a opláštěná, tudíž eliminuje prašnost při vyprazdňování vagónu. Uhlí je vedeno stávající dopravní cestou k samotnému skladu paliva. Sklad paliva (zásobníky) tvoří železobetonová konstrukce, ve které je palivo vedeno pásem. Shození paliva do patřičného místa je zajištěno šikmým hradítkem. Ze spodu je palivo vyhrnuto na stávající dopravní pás pro zauhlování.

klady:

- řeší snížení prašnosti
- zabraňuje samovznícení
- urychluje vyložení vagónu

zápory:

- vysoké náklady na přestavbu
- omezení provozu
- úprava stávající koleje

### **3.3 Volba koncepce zauhlování**

Po zvážení všech kladů a záporů možných variant zauhlování se snažím vybrat řešení, které umožní snížení prašnosti a omezí, případně úplně zabráni samovznícení uhelného paliva.

Nejvýhodnější z pohledu eliminace prašnosti a samovznícení se nabízí možnost hlubinné vykládky a skladu paliva. Náklady jsou sice vysoké, ale zajistí všechny požadavky kladené na úpravu zauhlování v Teplárně Zlín.

## 4. VÝPOČET A TEPELNÁ BILANCE PALIVA PRO TEPLÁRNU

Zpracováno dle [1], [2], [3], [5], [6].

Ve fluidních kotlích K31 a K32 se používá jako hlavní palivo hnědé uhlí v kvalitě zrnění ořech 2 dodávané z těžební společnosti Severočeské doly. Jako vedlejší palivo se přidává černé uhlí a biopalivo (malé množství).

Výpočet provedu s uvažováním provozu pouze na hlavní palivo. Vedlejší paliva se používají v malé míře, proto s nimi ve výpočtu neuvažuji. Pro výpočet použiji prvkový rozbor paliva z katalogu hnědého uhlí Severočeských dolů, který dodává palivo Teplárně Zlín.

### Prvkový rozbor HU zrnitost o2

označení	velikost	jednotka	význam
$C^r$	44,89	[% hm]	uhlík v surovém palivu
$H^r$	3,46	[% hm]	vodík v surovém palivu
$S^r_{\text{spal}}$	0,77	[% hm]	síra spalitelná v surovém palivu
$O^r$	13,28	[% hm]	kyslík v surovém palivu
$N^r$	0,56	[% hm]	dusík v surovém palivu
$W^r$	30,2	[% hm]	voda v surovém palivu
$A^r$	6,84	[% hm]	popelovina v surovém palivu
$\sum h^r + W^r + A^r$	100	[% hm]	suma prvků v palivu
$Q^r_i$	17600	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	výhřevnost surového paliva

Tab. 1. Prvkový rozbor HU [3]

### 4.1 Stechiometrie spalování

#### Teoretický spalovací vzduch

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r + \frac{22,39}{32,066} \cdot S^r_{\text{spal}} + \frac{22,39}{4,032} \cdot H^r - \frac{22,39}{32} \cdot O^r \quad [\text{m}^3_{\text{N}}.\text{kg}^{-1}] \quad (4-1)$$

kde:  $O_{O_2 \min}$  je objem kyslíku pro dokonalé spálení [m<sup>3</sup><sub>N</sub>.kg<sup>-1</sup>]

$C^r$	je uhlík v surovém palivu	[1]
$S^r_{\text{spal}}$	je síra spalitelná v surovém palivu	[1]
$H^r$	je vodík v surovém palivu	[1]
$O^r$	je kyslík v surovém palivu	[1]

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{12,011} \cdot 0,4489 + \frac{22,39}{32,066} \cdot 0,0077 + \frac{22,39}{4,032} \cdot 0,0346 - \frac{22,39}{32} \cdot 0,1328$$

$$O_{O_2 \min} = 0,940 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{VS \min} = \frac{O_{O_2 \min}}{0,2095} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4-2)$$

kde:  $O_{VS \min}$  je suchý vzduch teoretický  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$O_{O_2 \min}$  je objem kyslíku pro dokonalé spálení  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$$O_{VS \min} = \frac{0,940}{0,2095} = 4,487 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

### Skutečný spalovací vzduch

Abychom zajistili dokonalé spálení, musíme uvažovat s přebytkem vzduchu. Součinitel přebytku vzduchu je  $\alpha = 1,3$

$$O_{VS} = \alpha \cdot O_{VS \min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4-3)$$

kde:  $O_{VS}$  je suchý vzduch skutečný  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$\alpha$  je součinitel přebytku vzduchu [1]

$O_{VS \min}$  je suchý vzduch teoretický  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$$O_{VS} = 1,3 \cdot 4,487 = 5,833 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Vlivem vlhkosti v ovzduší dochází ke zvětšení objemu spalovacího vzduchu. Součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti je  $v = 1,03$

$$O_{VV} = O_{VS} \cdot v \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4-4)$$

kde:  $O_{VV}$  je vlhký vzduch skutečný  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$O_{VS}$  je suchý vzduch skutečný  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$v$  je součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti [1]

$$O_{VV} = 5,833 \cdot 1,03 = 6,001 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

### Teoretické spaliny

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4-5)$$

kde:  $O_{CO_2}$  je teoretický oxid uhličitý ve spalínách  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $C^r$  je uhlík v surovém palivu  $[1]$

$$O_{CO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,4489 = 0,832 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S_{spal}^r \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4-6)$$

kde:  $O_{SO_2}$  je teoretický oxid siřičitý ve spalínách  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu  $[1]$

$$O_{SO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0077 = 0,005 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{N_2min} = O_{N_2VSmin} + O_{N_2pal} = 0,7905 \cdot O_{VSmin} + \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4-7)$$

kde:  $O_{N_2min}$  je teoretický dusík ve spalínách  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{N_2VSmin}$  je dusík ve vzduchu  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{N_2pal}$  je dusík v palivu  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{VSmin}$  je suchý vzduch teoretický  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $N^r$  je dusík v surovém palivu  $[1]$

$$O_{N_2min} = 0,7905 \cdot 4,487 + \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0056 = 3,551 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

$$O_{PSmin} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4-8)$$

kde:  $O_{PSmin}$  je teoretický objem suchých spalin  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{CO_2}$  je teoretický oxid uhličitý ve spalínách  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{SO_2}$  je teoretický oxid siřičitý ve spalínách  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{N_2min}$  je teoretický dusík ve spalínách  $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$$O_{PSmin} = 0,832 + 0,005 + 3,551 = 4,388 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

## Skutečné spaliny

$$O_{N_2SK} = O_{N_2VS} + O_{N_2pal} = 0,7905 \cdot O_{VS} + \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (4-9)$$

kde:	$O_{N_2SK}$	je skutečný dusík ve spalínách	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$O_{N_2VS}$	je dusík ve vzduchu	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$O_{N_2pal}$	je dusík v palivu	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$O_{VS}$	je suchý vzduch skutečný	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$N^r$	je dusík v surovém palivu	[1]

$$O_{N_2SK} = 0,7905 \cdot 5,833 + \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0056 = 4,615 m^3_N \cdot kg^{-1}$$

$$O_{O_2} = 0,2095 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (4-10)$$

kde:	$O_{O_2}$	je kyslík ve spalínách celkový	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$\alpha$	je součinitel přebytku vzduchu	[1]
	$O_{VSmin}$	je suchý vzduch teoretický	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$

$$O_{O_2} = 0,2095 \cdot (1,3 - 1) \cdot 4,487 = 0,282 m^3_N \cdot kg^{-1}$$

$$O_{PS} = O_{PSmin} + (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (4-11)$$

kde:	$O_{PS}$	je skutečný objem suchých spalín	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$O_{PSmin}$	je teoretický objem suchých spalín	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$\alpha$	je součinitel přebytku vzduchu	[1]
	$O_{VSmin}$	je suchý vzduch teoretický	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$

$$O_{PS} = 4,388 + (1,3 - 1) \cdot 4,487 = 5,734 m^3_N \cdot kg^{-1}$$

$$O_{H_2O} = \frac{22,4}{2,016} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot W^r + \alpha \cdot (v - 1) \cdot O_{VSmin} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (4-12)$$

kde:	$O_{H_2O}$	je skutečná vodní pára ve spalínách	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$
	$H^r$	je vodík v surovém palivu	[1]
	$W^r$	je voda v surovém palivu	[1]
	$\alpha$	je součinitel přebytku vzduchu	[1]
	$v$	je součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti	[1]
	$O_{VSmin}$	je suchý vzduch teoretický	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$

$$O_{H_2O} = \frac{22,4}{2,016} \cdot 0,0346 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,302 + 1,3 \cdot (1,03 - 1) \cdot 4,487 = 0,935 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$O_{PV} = O_{PS} + O_{H_2O} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-13)$$

kde:  $O_{PV}$  je skutečný objem vlhkých spalin  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$O_{PS}$  je skutečný objem suchých spalin  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$O_{H_2O}$  je skutečná vodní pára ve spalinách  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$$O_{PV} = 5,734 + 0,935 = 6,669 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Koncentrace spalin skutečných

$$\omega_i = \frac{O_i}{O_{PV}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-14)$$

kde:  $\omega_i$  je koncentrace složky ve spalinách  $[\%]$

$O_i$  je objem složky ve spalinách  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$O_{PV}$  je skutečný objem vlhkých spalin  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$$\omega_{CO_2} = \frac{O_{CO_2}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,832}{6,669} \cdot 100 = 12,48 \%$$

$$\omega_{SO_2} = \frac{O_{SO_2}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,005}{6,669} \cdot 100 = 0,07 \%$$

$$\omega_{N_2} = \frac{O_{N_2SK}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{4,615}{6,669} \cdot 100 = 69,20 \%$$

$$\omega_{O_2} = \frac{O_{O_2}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,282}{6,669} \cdot 100 = 4,23 \%$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}}{O_{PV}} \cdot 100 = \frac{0,935}{6,669} \cdot 100 = 14,02 \%$$

Nyní provedu kontrolu sečtením všech koncentrací složek spalin. Výsledná suma musí být 100 %.

$$\sum \omega_i = \omega_{CO_2} + \omega_{SO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{O_2} + \omega_{H_2O} = 12,48 + 0,07 + 69,20 + 4,23 + 14,02$$

$$\sum \omega_i = 100 \% \rightarrow \text{výpočet je dobře}$$



Výše uvedené výpočty jsou vztaženy na jeden kilogram hnědého uhlí. Stechiometrie spalování bude stejná pro oba kotle, jelikož hlavní spalované palivo je hnědé uhlí.

## 4.2 Odsíření spalín kotle K31

Známe hodnoty :

označení	velikost	jednotka	význam
$P_{P-t}$	147	[MW]	tepelný příkon
$Q_i^r$	17600	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	výhřevnost surového paliva
$S_{spal}^r$	0,77	[% hm]	síra spalitelná v surovém palivu (vstup)
$O_{PS,K}$	7,946	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> .kg <sup>-1</sup> ]	množství spalín (nástřel-ověření)
$C_{SO_2}$	257	[mg.m <sup>-3</sup> <sub>N</sub> ]	SO <sub>2</sub> po odsíření (výstup)
CaCO <sub>3</sub>	0,94	[kg.kg <sup>-1</sup> ]	čistota vápence
Ca/S	2,5	[mol.mol <sup>-1</sup> ]	poměr Ca/S

Tab. 2. Hodnoty k výpočtu odsíření

Tepelný příkon udává pasport kotle K31. Níže bude ověřen výpočtem pomocí účinnosti kotle.

### Tok paliva do kotle

$$\dot{m}_{pal} = \frac{P_{P-t}}{Q_i^r} \quad [\text{kg.s}^{-1}] \quad (4-15)$$

kde:  $\dot{m}_{pal}$  je hmotový tok paliva [kg.s<sup>-1</sup>]  
 $P_{P-t}$  je tepelný příkon [MW]  
 $Q_i^r$  je výhřevnost surového paliva [kJ.kg<sup>-1</sup>]

$$\dot{m}_{pal} = \frac{147}{17,6} = 8,352 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Tok síry do kotle (vstup)

$$\dot{m}_S = S_{spal}^r \cdot \dot{m}_{pal} \quad [\text{kg.s}^{-1}] \quad (4-16)$$

kde:  $\dot{m}_S$  je hmotový tok síry [kg.s<sup>-1</sup>]  
 $S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu [1]  
 $\dot{m}_{pal}$  je hmotový tok paliva [kg.s<sup>-1</sup>]

$$\dot{m}_S = 0,0077 \cdot 8,352 = 64,3 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### **Tok SO<sub>2</sub> ve spalinách (výstup)**

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}} = O_{PS,K} \cdot C_{SO_2} \cdot \dot{m}_{pal} \cdot 10^{-6} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4-17)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}}$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$O_{PS,K}$	je množství spalin	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$C_{SO_2}$	je množství oxidu siřičitého po odsíření	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
$\dot{m}_{pal}$	je hmotový tok paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}} = 7,946 \cdot 257 \cdot 8,352 \cdot 10^{-6} = 17,06 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### **Tok SO<sub>2</sub> absorbovaného**

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}} = \dot{m}_S - \dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4-18)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}$	je hmotový tok síry absorbované	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_S$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}}$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}} = 64,3 \cdot 10^{-3} - 17,06 \cdot 10^{-3} = 47,24 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### **Účinnost odsíření**

$$\eta_S = \frac{\text{absorbované}}{\text{vstup}} = \frac{\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}}{\dot{m}_S} \quad [1] \quad (4-19)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}$	je hmotový tok síry absorbované	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_S$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$\eta_S = \frac{47,24 \cdot 10^{-3}}{64,3 \cdot 10^{-3}} = 0,73 \rightarrow 73 \%$$

### **Určení toku CaCO<sub>3</sub> – vápenec**

$$\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{m}_{SO_2 \text{ abs}} \cdot \frac{M_{CaCO_3}}{M_{SO_2}} \cdot \frac{Ca}{S} \cdot \frac{1}{\text{čistota}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4-20)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}$	je hmotový tok síry absorbované	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$M_{CaCO_3}$	je molární hmotnost uhličitanu vápenatého	$[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}]$

$M_{SO_2}$  je molární hmotnost oxidu siřičitého  $[g \cdot mol^{-1}]$

$$\dot{m}_{CaCO_3} = 47,24 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{64} \cdot 2,5 \cdot \frac{1}{0,94} = 0,196 \text{ kg} \cdot s^{-1} = 705,6 \text{ kg} \cdot h^{-1}$$

Vypočítaná hodnota je nižší oproti průměrné hodnotě, kterou udává pasport kotle K31. Množství vápence potřebného pro odsíření spalín ovlivňuje obsah síry v palivu, požadovaná koncentrace  $SO_2$  na výstupu ve spalínách a poměr Ca/S. Jelikož nejsou některé hodnoty přesně vyčísleny, po dohodě s vedoucím diplomové práce volím hodnoty uvedené v tab. 2. a výslednou spotřebu vápence беру za konečnou.

### Přepočet objemu vzduchu a spalín po odsíření

Znamé hodnoty:

označení	velikost	jednotka	význam
$\eta_{Ca}$	2,5	$[mol \cdot mol^{-1}]$	poměr Ca/S
$\eta_s$	73	$[\%]$	účinnost odsíření

Tab. 3. Vypočítané a stanovené hodnoty

$$O_{VS,K} = O_{VS} + 1,66779 \cdot S_{spal}^r \cdot \eta_s \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (4-21)$$

kde:  $O_{VS,K}$  je suchý vzduch skutečný po odsíření  $[m^3_N \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{VS}$  je suchý vzduch skutečný  $[m^3_N \cdot kg^{-1}]$   
 $S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu  $[1]$   
 $\eta_s$  je účinnost odsíření  $[1]$

$$O_{VS,K} = 5,833 + 1,66779 \cdot 0,0077 \cdot 0,73 = 5,842 \text{ m}^3_N \cdot kg^{-1}$$

- při odsíření  $CaCO_3$  platí následující vzorec

$$O_{PS,K} = O_{PS} + (0,63694 \cdot \eta_s + 0,69435 \cdot \eta_{Ca}) \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (4-22)$$

kde:  $O_{PS,K}$  je skutečný objem suchých spalín po odsíření  $[m^3_N \cdot kg^{-1}]$   
 $O_{PS}$  je skutečný objem suchých spalín  $[m^3_N \cdot kg^{-1}]$   
 $\eta_s$  je účinnost odsíření  $[1]$   
 $\eta_{Ca}$  je poměr Ca/S  $[mol \cdot mol^{-1}]$

$$O_{PS,K} = 5,734 + (0,63694 \cdot 0,73 + 0,69435 \cdot 2,5) = 7,935 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Vypočtená hodnota odpovídá cca nastřelené hodnotě, tudíž výpočet je správný.

$O_{H_2O}$  zůstává stejné

$$O_{PV,K} = O_{PS,K} + O_{H_2O} \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-23)$$

kde:  $O_{PV,K}$  je skutečný objem vlhkých spalin po odsíření  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$   
 $O_{PS}$  je skutečný objem suchých spalin po odsíření  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$   
 $O_{H_2O}$  je skutečná vodní pára ve spalinách  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$$O_{PV,K} = 7,935 + 0,935 = 8,870 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

Změna se  $\text{CO}_2$

$$O_{CO_2K} = O_{CO_2} + S_{spal}^r \cdot (0,00055 \cdot \eta_S + 0,69431 \cdot \eta_{Ca}) \quad [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-24)$$

kde:  $O_{CO_2K}$  je teoretický oxid uhličitý ve spalinách po odsíření  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$   
 $O_{CO_2}$  je teoretický oxid uhličitý ve spalinách  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$   
 $S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu [1]  
 $\eta_S$  je poměr Ca/S  $[\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}]$   
 $\eta_{Ca}$  je účinnost odsíření [1]

$$O_{CO_2K} = 0,832 + 0,0077 \cdot (0,00055 \cdot 0,73 + 0,69431 \cdot 2,5) = 0,845 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### Koncentrace spalin kotle K31 po odsíření

Nutné pro výpočet komínové ztráty.

$$\omega_{iK} = \frac{O_{iK}}{O_{PV,K}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-25)$$

kde:  $\omega_{i,K}$  je koncentrace složky ve spalinách po odsíření [%]  
 $O_{i,K}$  je objem složky ve spalinách po odsíření  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$   
 $O_{PV,K}$  je skutečný objem vlhkých spalin po odsíření  $[\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$

$$\omega_{CO_2K} = \frac{O_{CO_2K}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,845}{8,870} \cdot 100 = 9,53 \%$$

$$\omega_{SO_2K} = \frac{O_{SO_2}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,005}{8,870} \cdot 100 = 0,06 \%$$

$$\omega_{N_2K} = \frac{O_{N_2SK}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{4,615}{8,870} \cdot 100 = 52,03 \%$$

$$\omega_{O_2K} = \frac{O_{O_2}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,282}{8,870} \cdot 100 = 3,18 \%$$

$$\omega_{H_2O,K} = \frac{O_{H_2O}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,935}{8,870} \cdot 100 = 10,54 \%$$

Vlivem odsíření dochází ke změně objemu vzduchu a spalín.

### Měrná tepelná kapacita spalín kotle K31 po odsíření

Znamé hodnoty:

označení	velikost [100 °C]	velikost [200 °C]	jednotka
CO <sub>2</sub>	1,725	1,817	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
SO <sub>2</sub>	1,863	1,943	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
N <sub>2</sub>	1,306	1,310	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
O <sub>2</sub>	1,319	1,339	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
H <sub>2</sub> O	1,499	1,520	[kJ.m <sup>-3</sup> ]

Tab. 4 Střední měrné teplo při konstantním tlaku

Výpočet měrné tepelné kapacity spalín provedu pro teplotu 160 °C a určím ji pomocí interpolace mezi teplotami 100 °C a 200 °C.

$$c_{P,i,160} = \frac{c_{P200} - c_{P100}}{t_{200} - t_{100}} \cdot (t_{160} - t_{100}) + c_{P100} \quad [\text{kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}] \quad (4-26)$$

kde:  $c_{P,i,160}$  je měrná tepelná kapacita při 160 °C [kJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>]

$c_{P200}$  je měrná tepelná kapacita při 200 °C [kJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>]

$t_{200}$  je teplota spalín 200 °C [°C]

$$c_{P,CO_2,160} = \frac{1,817-1,725}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,725 = 1,780 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,SO_2,160} = \frac{1,943-1,863}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,863 = 1,911 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,N_2,160} = \frac{1,310-1,306}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,306 = 1,308 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,O_2,160} = \frac{1,339-1,319}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,319 = 1,331 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,H_2O,160} = \frac{1,520-1,499}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,499 = 1,512 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{PVK,160} = \sum c_{P,i,160} \cdot \omega_{iK} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4-27)$$

kde:  $c_{pvk,160}$  je měrná tepelná kapacita spalín při 160 °C  $[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$

$c_{P,i,160}$  je střední měrná tepelná kapacita při 160 °C  $[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$

$\omega_{iK}$  je koncentrace složky  $[1]$

$$c_{PVK,160} = c_{P,CO_2,160} \cdot \omega_{CO_2K} + c_{P,SO_2,160} \cdot \omega_{SO_2K} + c_{P,N_2,160} \cdot \omega_{N_2K} + c_{P,O_2,160} \cdot \omega_{O_2K} + c_{P,H_2O,160} \cdot \omega_{H_2OK}$$

$$c_{PVK,160} = 1,780 \cdot 0,0953 + 1,911 \cdot 0,0006 + 1,308 \cdot 0,5203 + 1,331 \cdot 0,0318 + 1,512 \cdot 0,1054 = 1,053 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Změna výhřevnosti paliva kotle K31 po odsíření

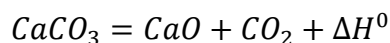
Následující tabulka udává hodnoty slučovacích tepel. Pozor, „záporné“ znaménko z pohledu energetického vyjadřuje produkci tepla a „kladné“ odběr tepla.

#### Energetická bilance

označení	velikost	jednotka
$\Delta H^0 \text{ CO}_2$	-393,6	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{ SO}_2$	-296,8	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{ CaCO}_3$	-1212,1	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{ CaO}$	-635,1	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{ CaSO}_4$	-1433,7	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$

Tab. 5. Slučovací tepla reakcí

### Reakční teplo kalcinace

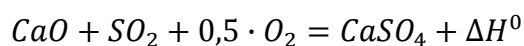


$$\Delta H_{\text{kalcinace}}^0 = \text{produkty} - \text{reagenty} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (4-28)$$

$$\Delta H_{\text{kalcinace}}^0 = -635,1 + (-393,6) - (-1212,1) = 183,4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Odebírá teplo (endotermická reakce)

### Reakční teplo sulfatace



$$\Delta H_{\text{sulfatace}}^0 = \text{produkty} - \text{reagenty} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (4-29)$$

$$\Delta H_{\text{sulfatace}}^0 = -1433,7 - (-635,1 - 296,8 - 0,5 \cdot 0) = -501,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Dodává teplo (exotermická reakce)

### Reakční teplo obou pochodů s ohledem na poměr Ca/s

$$\Delta H_{\text{ods}}^0 = \frac{\text{Ca}}{\text{S}} \cdot \Delta H_{\text{kalcinace}}^0 + \Delta H_{\text{sulfatace}}^0 \quad [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (4-30)$$

kde: Ca/S je poměr vápník/síry v palivu [mol. mol<sup>-1</sup>]

$$\Delta H_{\text{ods}}^0 = 2,5 \cdot 183,4 + (-501,8) = -43,3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### Celkové reakční teplo vztažené na obsah síry v palivu

$$m_{\text{sm}} = \frac{S_{\text{spal}}^r}{M_{\text{S}}} \quad [\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-31)$$

kde:  $m_{\text{sm}}$  je molární zastoupení síry v kilogramu [mol.kg<sup>-1</sup>]

$S_{\text{spal}}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu [1]

$M_{\text{S}}$  je molární hmotnost síry [kg.mol<sup>-1</sup>]

$$m_{\text{sm}} = \frac{0,0077}{32,1 \cdot 10^{-3}} = 0,24 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\Delta H_{\text{cel}}^0 = \Delta H_{\text{ods}}^0 \cdot m_{\text{sm}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-32)$$

kde:  $m_{sm}$  je molární zastoupení síry v kilogramu  $[mol.kg^{-1}]$

$$\Delta H_{cel}^0 = -43,3 \cdot 0,24 = -10,39 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Dodává teplo (exotermická reakce)

*Zdánlivá změna výhřevnosti*

$$q_{l,K} = Q_i^r + \Delta H_{cel}^0 \quad [kJ.kg^{-1}] \quad (4-33)$$

kde:  $q_{l,K}$  je zdánlivá změna výhřevnosti  $[kJ.kg^{-1}]$

$Q_i^r$  je výhřevnost paliva  $[kJ.kg^{-1}]$

Do výpočtu výhřevnosti dosazují “+” znaménko. Z pohledu energetiky se jedná o produkci tepla

$$q_{l,K} = 17600 + 10,39 = 17610 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Hmotnostní bilance

Do spalovacího prostoru se dostává palivo + odsiřovací látka.

Při odsiřování  $CaCO_3 \rightarrow k_s = 3,1219$ .

$$\mu_{ad} = S_{spal}^r \cdot \eta_{Ca} \cdot k_s \quad [1] \quad (4-34)$$

kde:  $\mu_{ad}$  je poměr toku vápence/toku paliva  $[1]$

$S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu  $[1]$

$\eta_{Ca}$  je poměr Ca/S  $[mol.mol^{-1}]$

$k_s$  je konstanta pro odsiřování vápencem  $[1]$

$$\mu_{ad} = 0,0077 \cdot 2,5 \cdot 3,1219 = 0,060$$

- přidáním vápence po spalování naroste původní popelovina ( $A^r + A_{CaO}$ )

$$A_{CaO} = 1,7492 \cdot S_{spal}^r \cdot (\eta_{Ca} - \eta_s) \quad [1] \quad (4-35)$$



kde:	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
	$S_{\text{spal}}^r$	je síra spalitelná v surovém palivu	[1]
	$\eta_{Ca}$	je poměr Ca/S	[mol.mol <sup>-1</sup> ]
	$\eta_s$	je účinnost odsíření	[1]

$$A_{CaO} = 1,7492 \cdot 0,0077 \cdot (2,5 - 0,73) = 0,02384 \rightarrow 2,384 \%$$

### 4.3 Ztráty kotle K31 při odsíření

Znamé hodnoty pro kotel K31:

označení	velikost	jednotka	význam
$t_p$	540	[°C]	teplota páry
$p_p$	9,6	[MPa]	tlak páry
$m_p$	170	[t.h <sup>-1</sup> ]	množství páry
$i_p$	3481	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	entalpie páry
$t_{nv}$	145	[°C]	teplota napájecí vody
$p_{nv}$	13,4	[MPa]	tlak napájecí vody
$i_{nv}$	618,9	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	entalpie napájecí vody
$t_{sp} = t_{pop}$	160	[°C]	teplota spalín a popílku
$\omega_{co}$	96	[ppm]	koncentrace CO
$t_{vz}$	25	[°C]	teplota vzduchu
$t_{fv} = t_{lp}$	850	[°C]	teplota fluidní vrstvy a ložového popela
$C_{lp}$	3	[%]	nedopal popel
$C_{pop}$	1	[%]	nedopal popílek
$X_{lp}$	70	[%]	zachycení popel
$X_{pop}$	30	[%]	zachycení popílek

Tab. 6. Parametry kotle K31

Ztráta hořlavinou v popílku

Při odsíření dochází ke změně popela a výhřevnosti

$$\zeta_{CpK} = \frac{C_{pop}}{100 - C_{pop}} \cdot \frac{X_{pop}}{100} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{ici} \quad [\%] \quad (4-36)$$

kde:	$\zeta_{cpk}$	je ztráta hořlavinou v popílku	[%]
	$C_{pop}$	je nedopal v popílku	[%]
	$X_{pop}$	je zachycení v popílku	[%]
	$A^r$	je popelovina v surovém palivu	[%]
	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
	$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
	$Q_{ici}$	je výhřevnost uhlíku	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]

$$\zeta_{cpK} = \frac{1}{100-1} \cdot \frac{30}{100} \cdot \frac{6,84+2,384}{17610} \cdot 32600 = 0,052 \%$$

*Ztráta hořlavinou v popelu*

$$\zeta_{C_{lp}K} = \frac{C_{lp}}{100-C_{lp}} \cdot \frac{X_{lp}}{100} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{ici} \quad [\%] \quad (4-37)$$

kde:	$\zeta_{Clpk}$	je ztráta hořlavinou v popelu	[%]
	$C_{lp}$	je nedopal v popelu	[%]
	$X_{lp}$	je zachycení v popelu	[%]
	$A^r$	je popelovina v surovém palivu	[%]
	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
	$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
	$Q_{ici}$	je výhřevnost uhlíku	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]

$$\zeta_{C_{lp}K} = \frac{3}{100-3} \cdot \frac{70}{100} \cdot \frac{6,84+2,384}{17610} \cdot 32600 = 0,370 \%$$

*Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích*

$$\zeta_{C,K} = \zeta_{cpK} + \zeta_{C_{lp}K} \quad [\%] \quad (4-38)$$

kde:	$\zeta_{c,k}$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	[%]
	$\zeta_{cpk}$	je ztráta hořlavinou v popílku	[%]
	$\zeta_{Clpk}$	je ztráta hořlavinou v popelu	[%]

$$\zeta_{C,K} = 0,052 + 0,370 = 0,422 \%$$

### Ztráta hořlavinou ve spalínách

$$\zeta_{CO,K} = \frac{100 - \zeta_{C,K}}{100} \cdot \frac{12610 \cdot \omega_{CO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{PS,K} \quad [\%] \quad (4-39)$$

kde:

$\zeta_{CO,K}$	je ztráta hořlavinou ve spalínách	[%]
$\zeta_{C,K}$	je ztráta v tuhých zbytcích	[%]
$\omega_{CO}$	je koncentrace oxidu uhelnatého ve spalínách	[%]
$O_{PS,K}$	je skutečný objem suchých spalín po odsíření	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> .kg <sup>-1</sup> ]

$$\zeta_{CO,K} = \frac{100 - 0,422}{100} \cdot \frac{12610 \cdot 96 \cdot 10^{-4}}{17610} \cdot 7,935 = 0,054 \%$$

### Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$c_{po} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{pop} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4-40)$$

kde:

$c_{po}$	je měrné teplo popílku	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$t_{pop}$	je teplota popílku	[°C]

$$c_{po} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = 0,792 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\zeta_{fpopK} = \frac{X_{pop}}{100 - C_{pop}} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot C_{po} \cdot t_{pop} \quad [\%] \quad (4-41)$$

kde:

$\zeta_{fpopK}$	je ztráta fyzickým teplem v popílku	[%]
$X_{pop}$	je zachycení popílku	[%]
$C_{pop}$	je nedopal popílku	[%]
$A^r$	je popelovina v surovém palivu	[%]
$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$c_{po}$	je měrné teplo popílku	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$t_{pop}$	je teplota popílku	[°C]

$$\zeta_{fpopK} = \frac{30}{100 - 1} \cdot \frac{6,84 + 2,384}{17600} \cdot 0,792 \cdot 160 = 0,020 \%$$

$$c_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{lp} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4-42)$$

kde:	$c_{lp}$	je měrné teplo ložového popela	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
	$t_{lp}$	je teplota ložového popela	$[^{\circ}C]$

$$c_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 850 = 1,139 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\zeta_{f_{lp}K} = \frac{X_{lp}}{100 - c_{lp}} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot C_{lp} \cdot t_{lp} \quad [\%] \quad (4-43)$$

kde:	$\zeta_{f_{lp}K}$	je ztráta fyzickým teplem v popelu	$[\%]$
	$X_{lp}$	je zachycení popela	$[\%]$
	$C_{lp}$	je nedopal popela	$[\%]$
	$A^r$	je popelovina v surovém palivu	$[\%]$
	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	$[1]$
	$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
	$c_{lp}$	je měrné teplo ložového popela	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
	$t_{lp}$	je teplota popela	$[^{\circ}C]$

$$\zeta_{f_{lp}K} = \frac{70}{100-3} \cdot \frac{6,84+2,384}{17610} \cdot 1,139 \cdot 850 = 0,657 \%$$

*Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků*

$$\zeta_{f,K} = \zeta_{f_{pop}K} + \zeta_{f_{lp}K} \quad [\%] \quad (4-44)$$

kde:	$\zeta_{f,K}$	je ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	$[\%]$
	$\zeta_{f_{pop}K}$	je ztráta fyzickým teplem v popílku	$[\%]$
	$\zeta_{f_{lp}K}$	je ztráta fyzickým teplem v popelu	$[\%]$

$$\zeta_{f,K} = 0,020 + 0,647 = 0,667 \%$$

*Ztráta citelným teplem spalín - komínová*

$$\zeta_{K,K} = (100 - \zeta_{c,K}) \cdot \frac{O_{PV,K} \cdot C_{PV,K,160} \cdot (t_{sp} - t_{vz})}{q_{l,K}} \quad [\%] \quad (4-45)$$

kde:	$\zeta_{K,K}$	je ztráta komínová	$[\%]$
	$\zeta_{c,K}$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	$[\%]$
	$O_{PV,K}$	je skutečný objem vlhkých spalín po odsíření	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$

$c_{pvk,160}$	je měrná tepelná kapacita spalin	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
$t_{sp}$	je teplota spalin	$[^{\circ}C]$
$t_{vz}$	je teplota vzduchu	$[^{\circ}C]$
$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	$[kJ.kg^{-1}]$

$$\zeta_{K,K} = (100 - 0,422) \cdot \frac{8,870 \cdot 1,053 \cdot (160 - 25)}{17610} = 7,130 \%$$

*Ztráta sdílením tepla do okolí*

V pasportu kotle K31 je uveden výkon 135 MW. Výpočtem ověřím tuto hodnotu.

$$D_j = \frac{\dot{m}_p}{3,6} \cdot (i_p - i_{nv}) \quad [MW] \quad (4-46)$$

kde:	$D_j$	je jmenovitý výkon kotle	$[MW]$
	$\dot{m}_p$	je množství páry	$[t.h^{-1}]$
	$i_p$	je entalpie páry	$[kJ.kg^{-1}]$
	$i_{nv}$	je entalpie napájecí vody	$[kJ.kg^{-1}]$

$$D_j = \frac{170}{3,6} \cdot (3481 - 618,9) = 135155 \text{ kW} = 135 \text{ MW} \rightarrow \text{souhlasí}$$

Ztrátu odečtu z nomogramu pro stanovené ztráty sdílením tepla do okolí (viz. níže).

Pozor, graf je v logaritmickém měřítku, musím zjistit základ logaritmu.

$$\log_a 100 - \log_a 1 = 110 \quad [1] \quad (4-47)$$

$$\log_a 100 = 110$$

$$100 = a^{110}$$

$$a = \sqrt[110]{100} = 1,043$$

Nejprve vypočtu vzdálenost na ose „y“ pro  $D_j = 135 \text{ MW}$

$$D_j = e^{(y \cdot \ln 1,043 + \ln 1)} \quad [MW] \quad (4-48)$$

$$\ln D_j = y \cdot \ln 1,043$$

$$y = \frac{\ln D_j}{\ln 1,043} = \frac{\ln 135}{\ln 1,043} = 117 \text{ mm}$$

Vzdálenost “y” zaznačím do nomogramu. Zjistím hodnotu vzdálenosti pro “x” a výpočet opakuji viz. výše. Z nomogramu  $x = 30 \text{ mm}$

$$\log_a 2 - \log_a 0,1 = 69 \quad [1] \quad (4-49)$$

$$\log_a 20 = 69$$

$$20 = a^{69}$$

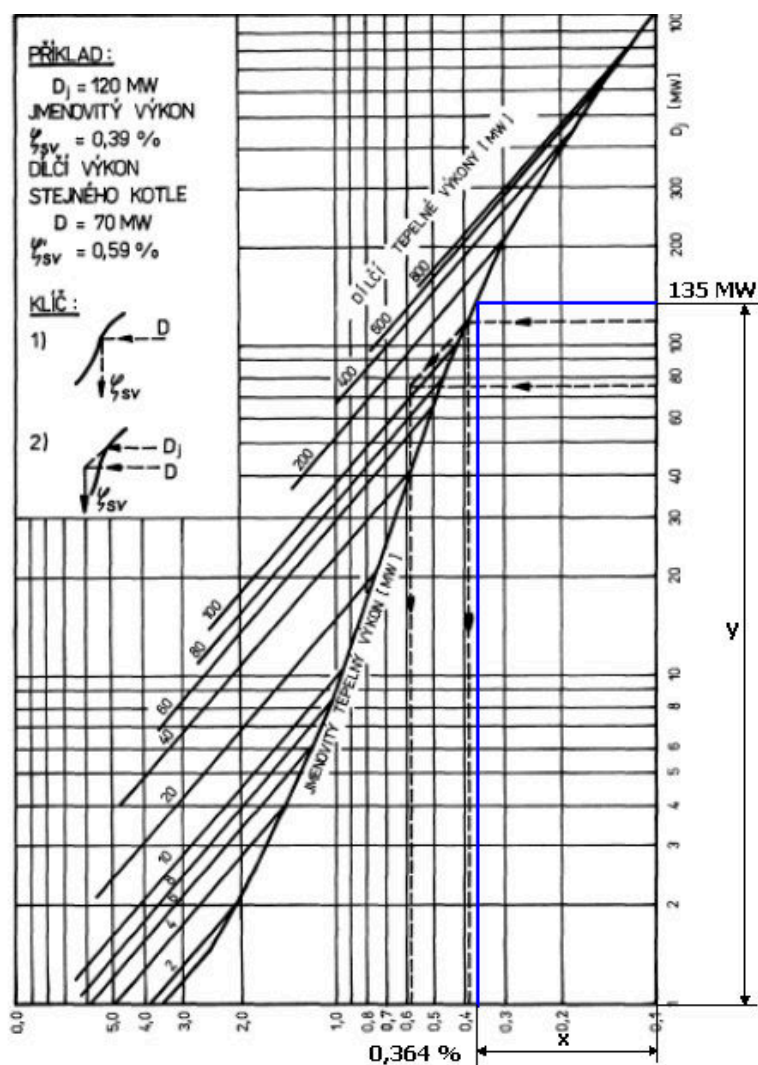
$$a = \sqrt[69]{20} = 1,044$$

Upřesním hodnotu ztráty pro  $x = 30 \text{ mm}$

$$\zeta_{SV} = e^{(x \cdot \ln 1,044 + \ln 1)} \quad [\%] \quad (4-50)$$

kde:  $\zeta_{SV}$  je ztráta sdílením tepla do okolí  $[\%]$

$$\zeta_{SV} = e^{(30 \cdot \ln 1,044 + \ln 1)} = 0,364 \%$$



Obr. 7. Nomogram pro stanovení ztráty sdílením tepla do okolí

#### 4.4 Stanovení účinnosti kotle K31 nepřímou metodou při odsíření

$$\eta_{K31} = 100 - (\zeta_{C,K} + \zeta_{CO,K} + \zeta_{f,K} + \zeta_{K,K} + \zeta_{SV}) \quad [\%] \quad (4-51)$$

kde:	$\zeta_{c,k}$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	[%]
	$\zeta_{co,k}$	je ztráta hořlavinou ve spalínách	[%]
	$\zeta_{f,K}$	je ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	[%]
	$\zeta_{K,K}$	je ztráta komínová	[%]
	$\zeta_{sv}$	je ztráta sdílením tepla do okolí	[%]

$$\eta_{K31} = 100 - (0,422 + 0,054 + 0,667 + 7,130 + 0,364) = 91,4 \%$$

#### 4.5 Porovnání s účinností uvedenou v pasportech kotle K31

Účinnost vypočítám pomocí přímé metody. V pasportech je výkon 135 MW a příkon 147 MW.

$$\eta_{K31,př} = \frac{\text{příkon}}{\text{výkon}} = \frac{135}{147} = 0,918 \rightarrow 91,8\% \quad [1] \quad (4-52)$$

Výsledek mohu považovat za správný.

#### 4.6 Tabulka vypočtených hodnot kotle K31

Uvedené hodnoty viz. níže vypočteny při jmenovitém výkonu 135 MW.

označení	velikost	jednotka	význam
$m_{\text{pal}}$	8,352	[kg.s <sup>-1</sup> ]	množství paliva do kotle
	30,1	[t.h <sup>-1</sup> ]	
$m_{\text{CaCO}_3}$	705,6	[kg.h <sup>-1</sup> ]	množství vápence
$\eta_{K31}$	91,4	[%]	účinnost kotle K31

Tab. 7. Vypočítané hodnoty kotle K31

## 4.7 Odsíření spalin kotle K32

Známe hodnoty :

označení	velikost	jednotka	význam
$P_{P-t}$	109	[MW]	tepelný příkon
$Q_i^r$	17600	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	výhřevnost surového paliva
$S_{spal}^r$	0,77	[% hm]	síra spalitelná v surovém palivu (vstup)
$O_{PS,K}$	7,946	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> .kg <sup>-1</sup> ]	množství spalin (nástřel-ověření)
$C_{SO_2}$	345	[mg.m <sup>-3</sup> <sub>N</sub> ]	SO <sub>2</sub> po odsíření (výstup)
$CaCO_3$	0,94	[kg.kg <sup>-1</sup> ]	čistota vápence
$Ca/S$	2,5	[mol.mol <sup>-1</sup> ]	poměr Ca/S

Tab. 8. Hodnoty k výpočtu odsíření

Tepelný příkon udává pasport kotle K32. Níže bude ověřen výpočtem pomocí účinnosti kotle.

### Tok paliva do kotle

$$\dot{m}_{pal} = \frac{P_{P-t}}{Q_i^r} \quad [kg.s^{-1}] \quad (4-53)$$

kde:  $m_{pal}$  je hmotový tok paliva [kg.s<sup>-1</sup>]  
 $P_{P-t}$  je tepelný příkon [MW]  
 $Q_i^r$  je výhřevnost surového paliva [kJ.kg<sup>-1</sup>]

$$\dot{m}_{pal} = \frac{109}{17,6} = 6,193 \text{ kg} \cdot s^{-1}$$

### Tok síry do kotle (vstup)

$$\dot{m}_S = S_{spal}^r \cdot \dot{m}_{pal} \quad [kg.s^{-1}] \quad (4-54)$$

kde:  $m_S$  je hmotový tok síry [kg.s<sup>-1</sup>]  
 $S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu [1]  
 $m_{pal}$  je hmotový tok paliva [kg.s<sup>-1</sup>]

$$\dot{m}_S = 0,0077 \cdot 6,193 = 47,69 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot s^{-1}$$



### Tok SO<sub>2</sub> ve spalínách (výstup)

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}} = O_{PS,K} \cdot C_{SO_2} \cdot \dot{m}_{pal} \cdot 10^{-6} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4-55)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}}$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$O_{PS,K}$	je množství spalin	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$C_{SO_2}$	je množství oxidu siřičitého po odsíření	$[\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}_{\text{N}}]$
$\dot{m}_{pal}$	je hmotový tok paliva	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}} = 7,946 \cdot 345 \cdot 6,193 \cdot 10^{-6} = 16,98 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Tok SO<sub>2</sub> absorbovaného

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}} = \dot{m}_S - \dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4-56)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}$	je hmotový tok síry absorbované	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_S$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_{SO_2 \text{ výstup}}$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}} = 47,69 \cdot 10^{-3} - 16,98 \cdot 10^{-3} = 30,71 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### Účinnost odsíření

$$\eta_s = \frac{\text{absorbované}}{\text{vstup}} = \frac{\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}}{\dot{m}_S} \quad [1] \quad (4-57)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}$	je hmotový tok síry absorbované	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\dot{m}_S$	je hmotový tok síry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$

$$\eta_s = \frac{30,71 \cdot 10^{-3}}{47,69 \cdot 10^{-3}} = 0,64 \rightarrow 64 \%$$

### Určení toku CaCO<sub>3</sub> – vápenec

$$\dot{m}_{CaCO_3} = \dot{m}_{SO_2 \text{ abs}} \cdot \frac{M_{CaCO_3}}{M_{SO_2}} \cdot \frac{Ca}{S} \cdot \frac{1}{\text{čistota}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4-58)$$

kde:

$\dot{m}_{SO_2 \text{ abs}}$	je hmotový tok síry absorbované	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$M_{CaCO_3}$	je molární hmotnost uhličitanu vápenatého	$[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$M_{SO_2}$	je molární hmotnost oxidu siřičitého	$[\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}]$

$$\dot{m}_{CaCO_3} = 30,71 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{100}{64} \cdot 2,5 \cdot \frac{1}{0,94} = 0,128 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 460,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Vypočítaná hodnota je nižší oproti průměrné hodnotě, kterou udává pasport kotle K31. Množství vápence potřebného pro odsíření spalin ovlivňuje obsah síry v palivu, požadovaná koncentrace SO<sub>2</sub> na výstupu ve spalinách a poměr Ca/S. Jelikož nejsou některé hodnoty přesně vyčísleny, po dohodě s vedoucím diplomové práce volím hodnoty uvedené v tab. 8. a výslednou spotřebu vápence беру za konečnou.

### Přepočet objemu vzduchu a spalin po odsíření

Znamé hodnoty:

označení	velikost	jednotka	význam
$\eta_{Ca}$	2,5	[mol.mol <sup>-1</sup> ]	poměr Ca/S
$\eta_S$	64	[%]	účinnost odsíření

Tab. 9. Vypočítané a stanovené hodnoty

$$O_{VS,K} = O_{VS} + 1,66779 \cdot S_{spal}^r \cdot \eta_S \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-59)$$

kde:	$O_{VS,K}$	je suchý vzduch skutečný po odsíření	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$O_{VS}$	je suchý vzduch skutečný	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$S_{spal}^r$	je síra spalitelná v surovém palivu	[1]
	$\eta_S$	je účinnost odsíření	[1]

$$O_{VS,K} = 5,833 + 1,66779 \cdot 0,0077 \cdot 0,64 = 5,841 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- při odsíření CaCO<sub>3</sub> platí následující vzorec

$$O_{PS,K} = O_{PS} + (0,63694 \cdot \eta_S + 0,69435 \cdot \eta_{Ca}) \quad [\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-60)$$

kde:	$O_{PS,K}$	je skutečný objem suchých spalin po odsíření	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$O_{PS}$	je skutečný objem suchých spalin	$[\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}]$
	$\eta_S$	je účinnost odsíření	[1]
	$\eta_{Ca}$	je poměr Ca/S	[mol.mol <sup>-1</sup> ]

$$O_{PS,K} = 5,734 + (0,63694 \cdot 0,64 + 0,69435 \cdot 2,5) = 7,878 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Vypočtená hodnota odpovídá cca nastřelené hodnotě, tudíž výpočet je správný.

$O_{H_2O}$  zůstává stejné

$$O_{PV,K} = O_{PS,K} + O_{H_2O} \quad [m^3_{N.kg^{-1}}] \quad (4-61)$$

kde:  $O_{PV,K}$  je skutečný objem vlhkých spalin po odsíření  $[m^3_{N.kg^{-1}}]$   
 $O_{PS}$  je skutečný objem suchých spalin po odsíření  $[m^3_{N.kg^{-1}}]$   
 $O_{H_2O}$  je skutečná vodní pára ve spalinách  $[m^3_{N.kg^{-1}}]$

$$O_{PV,K} = 7,878 + 0,935 = 8,813 \text{ } m^3_N \cdot kg^{-1}$$

Změna  $CO_2$

$$O_{CO_2K} = O_{CO_2} + S_{spal}^r \cdot (0,00055 \cdot \eta_S + 0,69431 \cdot \eta_{Ca}) \quad [m^3_{N.kg^{-1}}] \quad (4-62)$$

kde:  $O_{CO_2K}$  je teoretický oxid uhličitý ve spalinách po odsíření  $[m^3_{N.kg^{-1}}]$   
 $O_{CO_2}$  je teoretický oxid uhličitý ve spalinách  $[m^3_{N.kg^{-1}}]$   
 $S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu  $[1]$   
 $\eta_S$  je poměr Ca/S  $[mol.mol^{-1}]$   
 $\eta_{Ca}$  je účinnost odsíření  $[1]$

$$O_{CO_2K} = 0,832 + 0,0077 \cdot (0,00055 \cdot 0,64 + 0,69431 \cdot 2,5) = 0,845 \text{ } m^3_N \cdot kg^{-1}$$

### Koncentrace spalin kotle K32 po odsíření

Nutné pro výpočet komínové ztráty.

$$\omega_{iK} = \frac{O_{iK}}{O_{PV,K}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-63)$$

kde:  $\omega_{i,K}$  je koncentrace složky ve spalinách po odsíření  $[\%]$   
 $O_{i,K}$  je objem složky ve spalinách po odsíření  $[m^3_{N.kg^{-1}}]$   
 $O_{PV,K}$  je skutečný objem vlhkých spalin po odsíření  $[m^3_{N.kg^{-1}}]$

$$\omega_{CO_2K} = \frac{O_{CO_2K}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,845}{8,813} \cdot 100 = 9,59 \%$$

$$\omega_{SO_2K} = \frac{O_{SO_2}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,005}{8,813} \cdot 100 = 0,06 \%$$

$$\omega_{N_2K} = \frac{O_{N_2SK}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{4,615}{8,813} \cdot 100 = 52,37 \%$$

$$\omega_{O_2K} = \frac{O_{O_2}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,282}{8,813} \cdot 100 = 3,20 \%$$

$$\omega_{H_2O,K} = \frac{O_{H_2O}}{O_{PV,K}} \cdot 100 = \frac{0,935}{8,813} \cdot 100 = 10,61 \%$$

Vlivem odsíření dochází ke změně objemu vzduchu a spalín

### Měrná tepelná kapacita spalín kotle K32 po odsíření

Znamé hodnoty:

označení	velikost [100 °C]	velikost [200 °C]	jednotka
CO <sub>2</sub>	1,725	1,817	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
SO <sub>2</sub>	1,863	1,943	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
N <sub>2</sub>	1,306	1,310	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
O <sub>2</sub>	1,319	1,339	[kJ.m <sup>-3</sup> ]
H <sub>2</sub> O	1,499	1,520	[kJ.m <sup>-3</sup> ]

Tab. 10 Střední měrné teplo při konstantním tlaku

Výpočet měrné tepelné kapacity spalín provedu pro teplotu 160 °C a určím ji pomocí interpolace mezi teplotami 100 °C a 200 °C.

$$c_{P,i,160} = \frac{c_{P200} - c_{P100}}{t_{200} - t_{100}} \cdot (t_{160} - t_{100}) + c_{P100} \quad [\text{kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}] \quad (4-64)$$

kde:  $c_{P,i,160}$  je měrná tepelná kapacita při 160 °C [kJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>]  
 $c_{P200}$  je měrná tepelná kapacita při 200 °C [kJ.m<sup>-3</sup>.K<sup>-1</sup>]  
 $t_{200}$  je teplota spalín 200 °C [°C]

$$c_{P,CO_2,160} = \frac{1,817 - 1,725}{200 - 100} \cdot (160 - 100) + 1,725 = 1,780 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,SO_2,160} = \frac{1,943-1,863}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,863 = 1,911 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,N_2,160} = \frac{1,310-1,306}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,306 = 1,308 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,O_2,160} = \frac{1,339-1,319}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,319 = 1,331 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{P,H_2O,160} = \frac{1,520-1,499}{200-100} \cdot (160 - 100) + 1,499 = 1,512 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_{PVK,160} = \sum c_{P,i,160} \cdot \omega_{iK} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4-65)$$

kde:  $c_{pvk,160}$  je měrná tepelná kapacita spalin při 160 °C  $[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$

$c_{P,i,160}$  je střední měrná tepelná kapacita při 160 °C  $[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$

$\omega_{iK}$  je koncentrace složky  $[1]$

$$c_{PVK,160} = c_{P,CO_2,160} \cdot \omega_{CO_2K} + c_{P,SO_2,160} \cdot \omega_{SO_2K} + c_{P,N_2,160} \cdot \omega_{N_2K} + c_{P,O_2,160} \cdot \omega_{O_2K} + c_{P,H_2O,160} \cdot \omega_{H_2OK}$$

$$c_{PVK,160} = 1,780 \cdot 0,0953 + 1,911 \cdot 0,0006 + 1,308 \cdot 0,5203 + 1,331 \cdot 0,0318 + 1,512 \cdot 0,1054 = 1,053 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

### Změna výhřevnosti paliva kotle K32 po odsíření

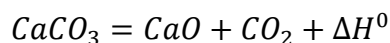
Následující tabulka udává hodnoty slučovacích tepel. Pozor, „záporné“ znaménko z pohledu energetického vyjadřuje produkci tepla a „kladné“ odběr tepla.

#### Energetická bilance

označení	velikost	jednotka
$\Delta H^0 \text{CO}_2$	-393,6	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{SO}_2$	-296,8	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{CaCO}_3$	-1212,1	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{CaO}$	-635,1	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
$\Delta H^0 \text{CaSO}_4$	-1433,7	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$

Tab. 11. Slučovací tepla reakcí

### Reakční teplo kalcinace

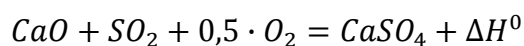


$$\Delta H_{\text{kalcinace}}^0 = \text{produkty} - \text{reagenty} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (4-66)$$

$$\Delta H_{\text{kalcinace}}^0 = -635,1 + (-393,6) - (-1212,1) = 183,4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Odebírá teplo (endotermická reakce)

### Reakční teplo sulfatace



$$\Delta H_{\text{sulfatace}}^0 = \text{produkty} - \text{reagenty} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (4-67)$$

$$\Delta H_{\text{sulfatace}}^0 = -1433,7 - (-635,1 - 296,8 - 0,5 \cdot 0) = -501,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Dodává teplo (exotermická reakce)

### Reakční teplo obou pochodů s ohledem na poměr Ca/s

$$\Delta H_{\text{ods}}^0 = \frac{\text{Ca}}{\text{S}} \cdot \Delta H_{\text{kalcinace}}^0 + \Delta H_{\text{sulfatace}}^0 \quad [\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (4-68)$$

kde: Ca/S je poměr vápník/síry v palivu  $[\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}]$

$$\Delta H_{\text{ods}}^0 = 2,5 \cdot 183,4 + (-501,8) = -43,3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

### Celkové reakční teplo vztažené na obsah síry v palivu

$$m_{\text{sm}} = \frac{S_{\text{spal}}^r}{M_{\text{S}}} \quad [\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-69)$$

kde:  $m_{\text{sm}}$  je molární zastoupení síry v kilogramu  $[\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}]$

$S_{\text{spal}}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu [1]

$M_{\text{S}}$  je molární hmotnost síry  $[\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$

$$m_{\text{sm}} = \frac{0,0077}{32,1 \cdot 10^{-3}} = 0,24 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\Delta H_{\text{cel}}^0 = \Delta H_{\text{ods}}^0 \cdot m_{\text{sm}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4-70)$$

kde:  $m_{sm}$  je molární zastoupení síry v kilogramu  $[\text{mol.kg}^{-1}]$

$$\Delta H_{cel}^0 = -43,3 \cdot 0,24 = -10,39 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Dodává teplo (exotermická reakce)

*Zdánlivá změna výhřevnosti*

$$q_{l,K} = Q_i^r + \Delta H_{cel}^0 \quad [\text{kJ.kg}^{-1}] \quad (4-71)$$

kde:  $q_{l,K}$  je zdánlivá změna výhřevnosti  $[\text{kJ.kg}^{-1}]$

$Q_i^r$  je výhřevnost paliva  $[\text{kJ.kg}^{-1}]$

Do výpočtu výhřevnosti dosazují “+” znaménko. Z pohledu energetiky se jedná o produkci tepla.

$$q_{l,K} = 17600 + 10,39 = 17610 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Hmotnostní bilance

Do spalovacího prostoru se dostává palivo + odsiřovací látka.

Při odsiřování  $\text{CaCO}_3 \rightarrow k_s = 3,1219$ .

$$\mu_{ad} = S_{spal}^r \cdot \eta_{Ca} \cdot k_s \quad [1] \quad (4-72)$$

kde:  $\mu_{ad}$  je poměr toku vápence/toku paliva  $[1]$

$S_{spal}^r$  je síra spalitelná v surovém palivu  $[1]$

$\eta_{Ca}$  je poměr Ca/S  $[\text{mol.mol}^{-1}]$

$k_s$  je konstanta pro odsiřování vápencem  $[1]$

$$\mu_{ad} = 0,0077 \cdot 2,5 \cdot 3,1219 = 0,060$$

- přidáním vápence po spalování naroste původní popelovina ( $A^r + A_{CaO}$ )

$$A_{CaO} = 1,7492 \cdot S_{spal}^r \cdot (\eta_{Ca} - \eta_s) \quad [1] \quad (4-73)$$

kde:	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
	$S_{\text{spal}}^r$	je síra spalitelná v surovém palivu	[1]
	$\eta_{Ca}$	je poměr Ca/S	[mol.mol <sup>-1</sup> ]
	$\eta_S$	je účinnost odsíření	[1]

$$A_{CaO} = 1,7492 \cdot 0,0077 \cdot (2,5 - 0,64) = 0,02505 \rightarrow 2,505 \%$$

#### 4.8 Ztráty kotle K32 při odsíření

Znamé hodnoty pro kotel K31:

označení	velikost	jednotka	význam
$t_p$	540	[°C]	teplota páry
$p_p$	9,6	[MPa]	tlak páry
$m_p$	125	[t.h <sup>-1</sup> ]	množství páry
$i_p$	3481	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	entalpie páry
$t_{nv}$	140	[°C]	teplota napájecí vody
$p_{nv}$	13,4	[MPa]	tlak napájecí vody
$i_{nv}$	597,7	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]	entalpie napájecí vody
$t_{sp} = t_{pop}$	160	[°C]	teplota spalín a popílku
$\omega_{co}$	10,5	[ppm]	koncentrace CO
$t_{vz}$	25	[°C]	teplota vzduchu
$t_{fv} = t_{lp}$	850	[°C]	teplota fluidní vrstvy a ložového popela
$C_{lp}$	3	[%]	nedopal popel
$C_{pop}$	1	[%]	nedopal popílek
$X_{lp}$	70	[%]	zachycení popel
$X_{pop}$	30	[%]	zachycení popílek

Tab. 12. Parametry kotle K31

Ztráta hořlavinou v popílku

Při odsíření dochází ke změně popela a výhřevnosti.

$$\zeta_{CpK} = \frac{C_{pop}}{100 - C_{pop}} \cdot \frac{X_{pop}}{100} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{ici} \quad [\%] \quad (4-74)$$



kde:	$\zeta_{cpk}$	je ztráta hořlavinou v popílku	[%]
	$C_{pop}$	je nedopal v popílku	[%]
	$X_{pop}$	je zachycení v popílku	[%]
	$A^r$	je popelovina v surovém palivu	[%]
	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
	$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
	$Q_{ici}$	je výhřevnost uhlíku	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]

$$\zeta_{C_pK} = \frac{1}{100-1} \cdot \frac{30}{100} \cdot \frac{6,84+2,505}{17610} \cdot 32600 = 0,052 \%$$

*Ztráta hořlavinou v popelu*

$$\zeta_{C_{lp}K} = \frac{C_{lp}}{100-C_{lp}} \cdot \frac{X_{lp}}{100} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{ici} \quad [\%] \quad (4-75)$$

kde:	$\zeta_{Clpk}$	je ztráta hořlavinou v popelu	[%]
	$C_{lp}$	je nedopal v popelu	[%]
	$X_{lp}$	je zachycení v popelu	[%]
	$A^r$	je popelovina v surovém palivu	[%]
	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
	$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
	$Q_{ici}$	je výhřevnost uhlíku	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]

$$\zeta_{C_{lp}K} = \frac{3}{100-3} \cdot \frac{70}{100} \cdot \frac{6,84+2,505}{17610} \cdot 32600 = 0,375 \%$$

*Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích*

$$\zeta_{C,K} = \zeta_{C_pK} + \zeta_{C_{lp}K} \quad [\%] \quad (4-76)$$

kde:	$\zeta_{c,k}$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	[%]
	$\zeta_{cpk}$	je ztráta hořlavinou v popílku	[%]
	$\zeta_{Clpk}$	je ztráta hořlavinou v popelu	[%]

$$\zeta_{C,K} = 0,052 + 0,375 = 0,427 \%$$

### Ztráta hořlavinou ve spalínách

$$\zeta_{CO,K} = \frac{100 - \zeta_{C,K}}{100} \cdot \frac{12610 \cdot \omega_{CO}}{q_{l,K}} \cdot Q_{PS,K} \quad [\%] \quad (4-77)$$

kde:

$\zeta_{CO,K}$	je ztráta hořlavinou ve spalínách	[%]
$\zeta_{C,K}$	je ztráta v tuhých zbytcích	[%]
$\omega_{CO}$	je koncentrace oxidu uhelnatého ve spalínách	[%]
$O_{PS,K}$	je skutečný objem suchých spalín po odsíření	[m <sup>3</sup> <sub>N</sub> .kg <sup>-1</sup> ]

$$\zeta_{CO,K} = \frac{100 - 0,427}{100} \cdot \frac{12610 \cdot 10,5 \cdot 10^{-4}}{17610} \cdot 7,878 = 0,006 \%$$

### Ztráta fyzickým teplem v popílku

$$c_{po} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{pop} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4-78)$$

kde:

$c_{po}$	je měrné teplo popílku	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$t_{pop}$	je teplota popílku	[°C]

$$c_{po} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 160 = 0,792 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\zeta_{fpopK} = \frac{X_{pop}}{100 - C_{pop}} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot C_{po} \cdot t_{pop} \quad [\%] \quad (4-79)$$

kde:

$\zeta_{fpopK}$	je ztráta fyzickým teplem v popílku	[%]
$X_{pop}$	je zachycení popílku	[%]
$C_{pop}$	je nedopal popílku	[%]
$A^r$	je popelovina v surovém palivu	[%]
$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	[1]
$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$c_{po}$	je měrné teplo popílku	[kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$t_{pop}$	je teplota popílku	[°C]

$$\zeta_{fpopK} = \frac{30}{100 - 1} \cdot \frac{6,84 + 2,505}{17610} \cdot 0,792 \cdot 160 = 0,020 \%$$

$$c_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{lp} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (4-80)$$

kde:	$c_{lp}$	je měrné teplo ložového popela	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
	$t_{lp}$	je teplota ložového popela	$[^{\circ}C]$

$$c_{lp} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 850 = 1,139 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\zeta_{f_{lp}K} = \frac{X_{lp}}{100 - c_{lp}} \cdot \frac{A^r + A_{CaO}}{q_{l,K}} \cdot C_{lp} \cdot t_{lp} \quad [\%] \quad (4-81)$$

kde:	$\zeta_{f_{lp}K}$	je ztráta fyzickým teplem v popelu	$[\%]$
	$X_{lp}$	je zachycení popela	$[\%]$
	$C_{lp}$	je nedopal popela	$[\%]$
	$A^r$	je popelovina v surovém palivu	$[\%]$
	$A_{CaO}$	je nárůst popeloviny nezreagovaným oxidem vápenatým	$[1]$
	$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
	$c_{lp}$	je měrné teplo ložového popela	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
	$t_{lp}$	je teplota popela	$[^{\circ}C]$

$$\zeta_{f_{lp}K} = \frac{70}{100-3} \cdot \frac{6,84+2,505}{17610} \cdot 1,139 \cdot 850 = 0,680 \%$$

*Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků*

$$\zeta_{f,K} = \zeta_{f_{pop}K} + \zeta_{f_{lp}K} \quad [\%] \quad (4-82)$$

kde:	$\zeta_{f,K}$	je ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	$[\%]$
	$\zeta_{f_{pop}K}$	je ztráta fyzickým teplem v popílku	$[\%]$
	$\zeta_{f_{lp}K}$	je ztráta fyzickým teplem v popelu	$[\%]$

$$\zeta_{f,K} = 0,020 + 0,680 = 0,700 \%$$

*Ztráta citelným teplem spalin - komínová*

$$\zeta_{K,K} = (100 - \zeta_{c,K}) \cdot \frac{O_{PV,K} \cdot C_{PV,K,160} \cdot (t_{sp} - t_{vz})}{q_{l,K}} \quad [\%] \quad (4-83)$$

kde:	$\zeta_{K,K}$	je ztráta komínová	$[\%]$
	$\zeta_{c,K}$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	$[\%]$
	$O_{PV,K}$	je skutečný objem vlhkých spalin po odsíření	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$

$c_{pvk,160}$	je měrná tepelná kapacita spalin	$[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$
$t_{sp}$	je teplota spalin	$[^{\circ}C]$
$t_{vz}$	je teplota vzduchu	$[^{\circ}C]$
$q_{l,K}$	je zdánlivá změna výhřevnosti	$[kJ.kg^{-1}]$

$$\zeta_{K,K} = (100 - 0,427) \cdot \frac{8,813 \cdot 1,053 \cdot (160 - 25)}{17610} = 7,084 \%$$

*Ztráta sdílením tepla do okolí*

V pasportu kotle K31 je uveden výkon 100 MW. Výpočtem ověřím tuto hodnotu.

$$D_j = \frac{\dot{m}_p}{3,6} \cdot (i_p - i_{nv}) \quad [MW] \quad (4-84)$$

kde:	$D_j$	je jmenovitý výkon kotle	$[MW]$
	$\dot{m}_p$	je množství páry	$[t.h^{-1}]$
	$i_p$	je entalpie páry	$[kJ.kg^{-1}]$
	$i_{nv}$	je entalpie napájecí vody	$[kJ.kg^{-1}]$

$$D_j = \frac{125}{3,6} \cdot (3481 - 597,7) = 100115 \text{ kW} = 100 \text{ MW} \rightarrow \text{souhlasí}$$

Ztrátu odečtu z nomogramu pro stanovené ztráty sdílením tepla do okolí (viz. níže). Pozor, graf je v logaritmickém měřítku, musím zjistit základ logaritmu. Ovšem pro hodnotu 100 MW není nutno dělat přepočty, je zde přímo uvedena.

Vynesu hodnotu 100 MW do nomogramu. Zjistím vzdálenosti pro "x", nejprve vypočtu velikost logaritmického základu, potom počítám samotnou ztrátu, hodnota  $x = 34$  mm.

$$\log_a 2 - \log_a 0,1 = 69 \quad [1] \quad (4-85)$$

$$\log_a 20 = 69$$

$$20 = a^{69}$$

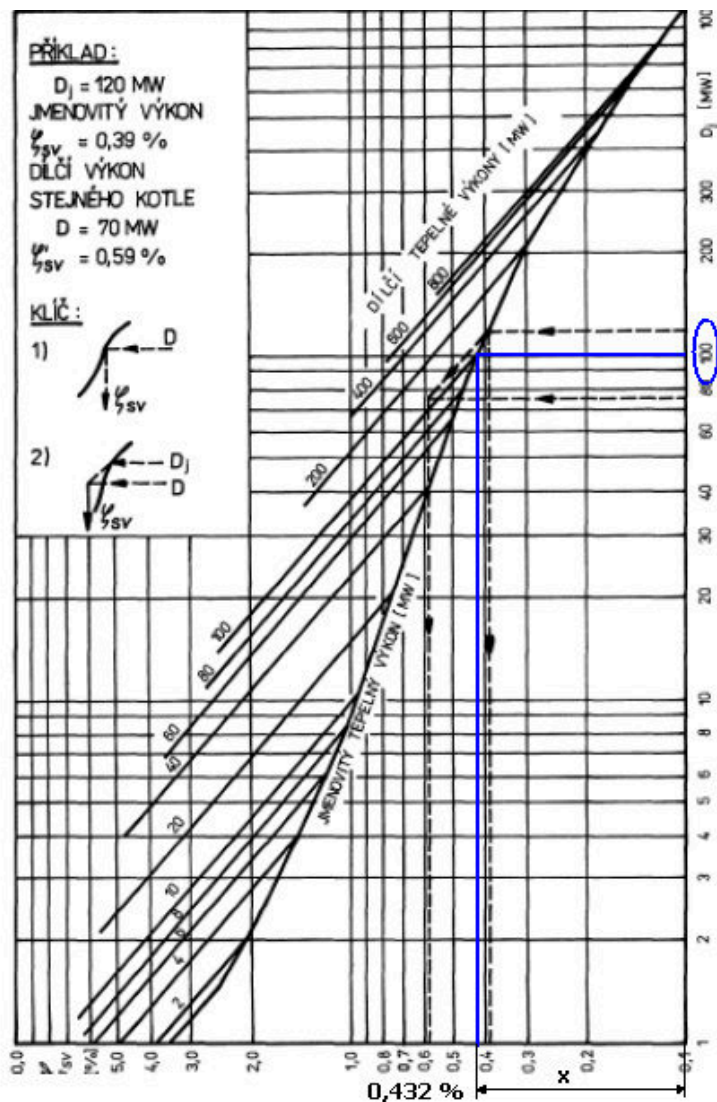
$$a = \sqrt[69]{20} = 1,044$$

Upřesním hodnotu ztráty pro  $x = 34$  mm

$$\zeta_{SV} = e^{(x \cdot \ln 1,044 + \ln 0,1)} \quad [\%] \quad (4-86)$$

kde:  $\zeta_{SV}$  je ztráta sdílením tepla do okolí  $[\%]$

$$\zeta_{SV} = e^{(34 \cdot \ln 1,044 + \ln 0,1)} = 0,432 \%$$



Obr. 8. Nomogram pro stanovení ztráty sdílením tepla do okolí

#### 4.9 Stanovení účinnosti kotle K32 nepřímou metodou při odsíření

$$\eta_{K31} = 100 - (\zeta_{C,K} + \zeta_{CO,K} + \zeta_{f,K} + \zeta_{K,K} + \zeta_{SV}) \quad [\%] \quad (4-87)$$

kde:  $\zeta_{c,k}$  je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích  $[\%]$

$\zeta_{co,k}$  je ztráta hořlavinou ve spalínách  $[\%]$

$\zeta_{f,K}$  je ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků  $[\%]$

$\zeta_{K,K}$  je ztráta komínová  $[\%]$

$\zeta_{SV}$  je ztráta sdílením tepla do okolí  $[\%]$

$$\eta_{K31} = 100 - (0,427 + 0,006 + 0,700 + 7,084 + 0,432) = 91,4 \%$$

#### 4.10 Porovnání s účinností uvedenou v pasportech kotle K32

Účinnost vypočítám pomocí přímé metody. V pasportech je výkon 100 MW a příkon 109 MW.

$$\eta_{K31,př} = \frac{\text{příkon}}{\text{výkon}} = \frac{100}{109} = 0,917 \rightarrow 91,7\% \quad [1] \quad (4-88)$$

Výsledek mohu považovat za správný.

#### 4.11 Tabulka vypočtených hodnot kotle K32

Uvedené hodnoty viz. níže vypočteny při jmenovitém výkonu 135 MW.

označení	velikost	jednotka	význam
m <sub>pal</sub>	6,193	[kg.s <sup>-1</sup> ]	množství paliva do kotle
	22,3	[t.h <sup>-1</sup> ]	
m <sub>CaCO3</sub>	460,8	[kg.h <sup>-1</sup> ]	množství vápence
η <sub>K32</sub>	91,4	[%]	účinnost kotle K32

Tab. 13. Vypočítané hodnoty kotle K32

#### 4.12 Tepelná bilance paliva pro teplárnu

Zpracováno dle [6].

##### Hodnoty spotřeby paliva vypočtené z účinnosti kotlů

Pokud je teplota – 5 °C a nižší, provozují se kotle na 100% jmenovitého výkonu. Spotřeba paliva se bude pohybovat cca 1200 t.den<sup>-1</sup>. Jelikož se na kotlích musí provádět údržba (mimo topnou sezónu), počet provozních hodin za rok klesá. Odstávka bývá

zpravidla 45 dní (pro jeden kolem, druhý je v provozu), potom počet provozních hodin je 320 dní v roce  $\rightarrow 7680 \text{ hod.rok}^{-1}$ .

Výpočet provedu u kotle K31, kotel K32 má stejný postup výpočtu, který nebudu uvádět. Výsledné hodnoty se objeví v tabulce, kde porovnáím hodnoty dodané Teplárnou Zlín a hodnoty vypočítané pro maximální výkon kotlů. Je jasné, že tento jev nemůže nastat, slouží pouze pro porovnání hodnot reálných a maximálně možných.

### ***K31 – spotřeba paliva při 100% výkonu kotle***

$$m_{pal} = \frac{výkon}{Q_i^r \cdot \eta_{K31}} \quad [\text{kg.s}^{-1}] \quad (4-89)$$

kde:  $m_{pal}$  je množství paliva do kotle  $[\text{kg.s}^{-1}]$   
výkon je výkon kotle  $[\text{MW}]$   
 $Q_i^r$  je výhřevnost paliva  $[\text{MJ.kg}^{-1}]$   
 $\eta_{K31}$  je účinnost kotle  $[1]$

$$m_{pal} = \frac{135}{17,610 \cdot 0,914} = 8,387 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

### ***K31 – spotřeba paliva při 100% výkonu kotle za rok***

$$m_{pal,rok} = m_{pal,max} \cdot 3,6 \cdot \tau_{rok} \quad [\text{t.rok}^{-1}] \quad (4-90)$$

kde:  $m_{pal}$  je množství paliva do kotle  $[\text{t.rok}^{-1}]$   
 $\tau_{rok}$  je počet provozních hodin za rok  $[\text{hod.rok}^{-1}]$

$$m_{pal,rok} = 8,387 \cdot 3,6 \cdot 7680 = 231\,884 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$$

### ***K31 – výroba tepla při 100% výkonu kotle za rok***

$$Q_{t,K31} = výkon \cdot 3,6 \cdot \tau_{rok} \quad [\text{GJ.rok}^{-1}] \quad (4-91)$$

kde  $\tau_{rok}$  je počet provozních hodin za rok  $[\text{hod.rok}^{-1}]$

$$Q_{t,K31} = 135 \cdot 3,6 \cdot 7680 = 3\,732\,480 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

### ***K31 – ztráty tepla při 100% výkonu kotle za rok***

$$Q_{ztr,K31} = \frac{Q_{t,K31}}{(100-\eta_{K31})} \quad [\text{GJ.rok}^1] \quad (4-92)$$

kde:  $\eta_{K31}$  je účinnost kotle [1]  
 $Q_{t,K31}$  je výroba tepla za rok [GJ.rok<sup>1</sup>]

$$Q_{ztr,K31} = \frac{3\,732\,480}{(100-91,4)} = 434\,009 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

### ***K31 – teplo na výrobu elektrické energie při 100% výkonu kotle za rok***

Turbogenerátor kotle K31 má výkon 25 MWe. Uvažuji, že pojede neustále. Účinnost turbogenerátoru je 90 % (na straně pára – turbina).

$$Q_{t-el,K31} = \frac{\text{výkon TG}}{\eta_{TG}} \cdot 3,6 \cdot \tau_{rok} \quad [\text{GJ.rok}^1] \quad (4-93)$$

kde  $\tau_{rok}$  je počet provozních hodin za rok [hod.rok<sup>1</sup>]  
 $\eta_{TG}$  je účinnost turbogenerátoru [1]

$$Q_{t-el,K31} = \frac{25}{0,9} \cdot 3,6 \cdot 7680 = 768\,000 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

### ***K31 – výroba elektrické energie při 100% výkonu turbogenerátoru za rok***

$$Q_{el,K31} = \text{výkon TG} \cdot \tau_{rok} \quad [\text{MWh.rok}^1] \quad (4-94)$$

kde  $\tau_{rok}$  je počet provozních hodin za rok [hod.rok<sup>1</sup>]

$$Q_{el,K31} = 25 \cdot 7680 = 192\,000 \text{ MWh} \cdot \text{rok}^{-1}$$

### ***K31 – teplo dodané do rozvodů při 100% výkonu kotle za rok***

$$Q_{t-roz,K31} = Q_{t,K31} - Q_{t-el,K31} \quad [\text{GJ.rok}^1] \quad (4-95)$$

kde  $Q_{t,K31}$  je celková výroba tepla za rok [GJ.rok<sup>1</sup>]  
 $Q_{t-el,K31}$  je teplo na výrobu elektrické energie [GJ.rok<sup>1</sup>]



$$Q_{t-roz,K31} = 3\,732\,480 - 768\,000 = 2\,964\,480 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

***K31 – celková energie přivedená v palivu do kotle při 100% výkonu***

$$Q_{t-cel,K31} = Q_{t,K31} + Q_{ztr,K31} \quad [\text{GJ} \cdot \text{rok}^{-1}] \quad (4-96)$$

kde  $Q_{t,K31}$  je celková výroba tepla za rok  $[\text{GJ} \cdot \text{rok}^{-1}]$

$Q_{ztr,K31}$  je ztráta (vlastní spotřeba) tepla za rok  $[\text{GJ} \cdot \text{rok}^{-1}]$

$$Q_{t-cel,K31} = 3\,732\,480 + 434\,009 = 4\,166\,489 \text{ GJ} \cdot \text{rok}^{-1}$$

***Tepelná bilance fluidního kotle K31 při maximálním výkonu:***

- výroba tepla	3 732 480	GJ.rok <sup>-1</sup>
- teplo na výrobu elektrické energie	768 000	GJ.rok <sup>-1</sup>
- dodávka tepla do rozvodů	2 964 480	GJ.rok <sup>-1</sup>
- výroba elektrické energie	192 000	MWh.rok <sup>-1</sup>
- vlastní spotřeba	434 009	GJ.rok <sup>-1</sup>

***Množství paliva pro K31 při maximálním výkonu:***

- hnědé uhlí	231 884	t.rok <sup>-1</sup>
- celková energie v palivu	4 166 489	GJ.rok <sup>-1</sup>

**Hodnoty reálné poskytl Teplárna Zlín**

***Tepelná bilance fluidních kotlů:***

- výroba tepla na kotlech	3 342 000	GJ.rok <sup>-1</sup>
- teplo na výrobu elektrické energie	1 551 500	GJ.rok <sup>-1</sup>
- dodávka tepla do rozvodů	1 455 800	GJ.rok <sup>-1</sup>
- výroba elektrické energie	194 100	MWh.rok <sup>-1</sup>
- vlastní spotřeba	334 700	GJ.rok <sup>-1</sup>

***Množství paliva:***

- černé uhlí	7 194	t.rok <sup>-1</sup>
- hnědé uhlí	163 740	t.rok <sup>-1</sup>
- biomasa	16 650	t.rok <sup>-1</sup>

- celková energie v palivu 3 680 000 GJ.rok<sup>-1</sup>

Hodnoty jsou spíše orientační, množství paliva je měřeno pásovou váhou na vstupu do kotelny. Bilance byla provedena pro rok 2011 a bude závislá na konkrétních klimatických podmínkách.

#### **Přehled reálných a vypočtených maximálních hodnot pro kotle K31 a K32**

- reálné hodnoty pro rok 2011
- vypočtené hodnoty při maximálních výkonech s odstávky na údržbu

<b>význam</b>	<b>reálné K31 + K32</b>	<b>vypočtené K31 + K32</b>	<b>jednotka</b>
výroba tepla na kotlech	3 342 000	6 497 280	[GJ.rok <sup>-1</sup> ]
teplo na výr. el. energie	1 551 500	1 781 760	[GJ.rok <sup>-1</sup> ]
dodávka tepla do rozvodů	1 455 800	4 715 520	[GJ.rok <sup>-1</sup> ]
výroba elektrické energie	194 100	445 440	[MWh.rok <sup>-1</sup> ]
vlastní spotřeba (ztráty)	334 700	755 497	[GJ.rok <sup>-1</sup> ]
černé uhlí	7 194	-	[t.rok <sup>-1</sup> ]
hnědé uhlí	163 740	403 661	[t.rok <sup>-1</sup> ]
biomasa	16 650	-	[t.rok <sup>-1</sup> ]
celková energie v palivu	3 680 000	7 252 777	[GJ.rok <sup>-1</sup> ]

*Tab. 14. Tepelná bilance kotlů*

## **5. NÁVRH KONCEPCE ZAUHLOVÁNÍ**

V samotném návrhu budu řešit realizaci hlubinné vykládky a skladu paliva. Tato možnost úpravy zauhlování se jeví jako nejvýhodnější varianta. Níže podrobněji popíšu technologii, postupy a vše potřebné k realizaci.

Koncepčně vycházím ze zauhlování v Teplárně Kolín, kde bylo v roce 2010 zhotoveno firmou Envirmine-Energo. V příloze jsou k nahlédnutí fotografie stávajícího zauhlování Teplárny Kolín.

Zpracováno dle [6], [7], [8].

### **5.1 Hlubinná vykládka paliva**

#### **5.1.1 Popis provozu**

Provoz slouží k vyuhlování vagónů v Teplárně Zlín. Součástí vlečky, na kterou jsou dopraveny vagóny s uhlím je hlubinný zásobník paliva. Koleje vlečky vedou nad podzemní betonovou násypku, která má objem 120 m<sup>3</sup>. Abychom zajistili správné vyložení vagónu, musí být ustaven v patřičné poloze. Po obou stranách vagónu jsou výsypné klapky a po jejich otevření dojde k vyprázdnění loženého uhlí přes ocelový rošt do násypky. K otevření výsypných klapek slouží pneumatický pohon.

Součástí hlubinného zásobníku je zastřešení a oddělení od okolí, které tvoří ocelová konstrukce s opláštěním. Přesypná věž je součástí vykládky paliva a je také zastřešená a opláštěná.

Po vyprázdnění obsahu vagónu jde uhlí následujícími dopravními cestami směrem ke skladu paliva (sila). Dopravní cesta je složena z vyhrnovacího vozu, pásových dopravníků, svislého pásového dopravníku, separátoru neželezných a železných kovů.

V případě montáže a údržby hlubinné vykládky jsou na určených místech objektu jeřábové drážky vybavené ručními kladkostroji.

### 5.1.2 Předpokládaná kapacita provozu

Provoz je stanoven jako 2-směnný (provoz technologie od 6 do 22 hodin). Kapacita provozu závisí na aktuálních klimatických podmínkách. Letní období (6 měsíců) cca 600 t.den<sup>-1</sup> a v zimním období (6 měsíců) v případě, že teplota klesne pod – 5 °C cca 1200 t.den<sup>-1</sup>. Celková roční spotřeba hnědého uhlí je cca 200 000 t.rok<sup>-1</sup>.

#### Údaje o hnědém uhlí:

- ořech 2 (Doly Bílina)

význam	velikost	jednotka
zrnitost	10 - 25	[mm]
sypná hmotnost	720	[kg.m <sup>-3</sup> ]
obsah vody (reálný)	30 - 45	[%]

Tab. 15. Vlastnosti hnědého uhlí - ořech 2 [3]

### 5.1.3 Popis provozu na železniční vlečce

Strojvedoucí sune všechny vagóny (cca 22 vozů typu falls) ze stanice Zlín Střed do areálu Teplárny Zlín. Souprava o maximálně 7 vagonech (zbytek se odpojí a nechá na vedlejší koleji) je sunuta na kolej vedoucí k hlubinné vykládce paliva. Souprava projede hlubinnou vykládkou paliva (vagóny tlačeny lokomotivou) a zastaví se. Pořadí bude následující: lokomotiva, vagón (nad hlubinou vykládkou v přesně dané poloze) a zbytek vagónů za hlubinou vykládkou.

Obsluha propojí systém otevírání výsypných klapek vagónu s tlakovým vzduchem 0.5 MPa pomocí pružné hadice a rychlouzávěrné hlavice. Vagón lze připojit na obou koncích. Ovládání rozvodu vzduchu je umístěno na brzdářské plošině vagónu. Po otevření bočních výsypných klapek (levá a pravá) je vagón gravitačně vyprázdněn přes rošt do hlubinného zásobníku. Obsluha po vyprázdnění vagónu provede vizuální kontrolu z pochůzkových plošin na výškové úrovni + 5,86 m (plošiny po obou stranách nad vagónem). V případě, že po vyprázdnění zůstanou nálepy na vnitřní straně vagónu, provede obsluha dočištění pomocí zařízení zavěšeného na kladkostroji. Čistící zařízení se

pohybuje na kladkostroji a jeho dráha je v ose hlubinné vykládky. Pojezd i zdvih je ovládán elektricky. Uzavření výsypných klapek (pneumatické) provede obsluha po kontrole a případném dočistění vagónu. Veliký důraz je kladen na správné uzavření klapek vagónu, pokud některá z nich nedosedne, provede obsluha opětovné otevření a uzavření až do doby, kdy jsou všechny klapky správně uzavřeny.

Je-li vagón vyprázdněn a řádně uzavřen, dostane strojvedoucí pokyn pro posun dalšího vagónu nad hlubinnou vykládku. Po dosažení přesně dané polohy vagónu může obsluha připojit tlakový vzduch k vagónu a celý postup uvedený viz. výše opakovat.

Po vyložení posledního vagónu sune strojvedoucí prázdné vagóny na vedlejší kolej a přistaví opět ložené do prostoru nad hlubinnou vykládku paliva a celý postup se opakuje viz. výše. Nakonec jsou prázdné vagóny sunuty zpět na nádraží Zlín Střed.

#### **5.1.4 Popis technologie provozu**

Hranice provozu tvoří vybavení hlubinné vykládky a stávající pásový dopravník T2. K zauhlování se použijí samovýsypné železniční vozy typu Falls.

Z hlubinného zásobníku o objemu  $120 \text{ m}^3$  (1,5 vagónu) je uhlí vyhrabováno pomocí jednostranného vyhrnovacího vozu. Regulaci pohonu vyhrnovací růžice zajišťuje frekvenční měnič, rozsah výkonu vyhrnování  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Uhlí dále pokračuje na pásový dopravník V.1 o dopravní kapacitě maximálně  $100 \text{ t.h}^{-1}$ . Pásový dopravník V.1 se nachází v hlubinném zásobníku na úrovni  $- 5,8 \text{ m}$ . Nad pásovým dopravníkem V.1 je umístěn permanentní odlučovač kovových předmětů (pásový s bočním vynášením). Zachycené kovové předměty jsou dopraveny separátorem do kontejneru, který se nachází na podlaží  $- 5,4 \text{ m}$ . Na pásový dopravník V.1 přes přesyp navazuje dvojitý svislý pásový dopravník V.3, který dosahuje kapacity maximálně  $100 \text{ t.h}^{-1}$  a je umístěn na úrovni  $- 7,8 \text{ m}$ . Pásový dopravník z této úrovně vynese uhlí do výšky  $+ 2,4 \text{ m}$ . Pod přesypem koncové stanice pásového dopravníku V.3 je umístěn pásový dopravník V.2 s maximální kapacitou  $100 \text{ t.h}^{-1}$ . Pásový dopravník je ložen na ocelové konstrukci (opláštěné) přesypné věže navazující na opláštění a ocelovou konstrukci nad hlubinným zásobníkem. Indikátor železných a neželezných kovů je umístěn na konstrukci pásového dopravníku V.2, zjistí-li přítomnost kovového předmětu, automaticky odstavuje předcházející dopravní cesty.

Obsluha musí ručně odstranit předmět z pásu a telefonicky oznámi na velín opětovné spuštění dopravních cest.

Na pásový dopravník V.2 navazuje pásový dopravník T.2. Napojení pásového dopravníku V.2 a pásového dopravníku T.2 je realizováno pomocí přesypné věže. Ta je tvořena opláštěnou ocelovou konstrukcí navazující přímo na ocelovou konstrukci pod pásovým dopravníkem V.2 a nadzemní část hlubinného zásobníku. Pásový dopravník T.2 je vybaven dopadovým ložem pod násypkou z pásového dopravníku V.2 a pro omezení prašnosti je opatřen bočním dvojitým těsněním. V případě okamžité potřeby zauhlování je uhlí přímo dávkováno do mezizásobníku paliva pro kotle pásovým dopravníkem T.2 bez využití skladu paliva.

K omezení prašnosti je po celé délce vyhrnovací spára hlubinného zásobníku osazena gumovou clonou, ta je automaticky přizvednuta vozíkem vyhrnovacího vozu v místě jeho činnosti. Uchycení gumové clony je na stěně hlubinného zásobníku.

Dopravní cesty a přesypy vybaveny mlžícím zařízením (tlakový vzduch + voda), které slouží k omezení prašnosti.

Pásové dopravníky vybaveny dopadovým (podpěrovým) ložem, aby zajistili spolehlivé utěsnění přesypů. Násypky jsou utěsněny bočním dvojitým těsněním. Svodky přesypů částečně vyloženy otěruvzdorným materiálem v místě kontaktu s uhlím, mají dobré kluzné vlastnosti (omezení nálepů). Opláštěná ocelová konstrukce snižuje prašnost, hlučnost.

Zařízení je zcela automatizované s možností přepnutí do ručního provozu. Kamerový systém zajišťuje trvalý dozor nad provozem a obsluha provádí pochůzky v daných intervalech. Světelná a zvuková signalizace varuje před spuštěním linky. Rotující části vybaveny ochrannými kryty. Bezpečnostní vypínače umístěny u příslušné technologie. Snímače nestandardních podmínek (otáčky, vybočení pásu, zahlcení přesypu) hlídají provoz celého systému. Dále je hlubinná vykládka vybavena protiexplozivním systémem, podtlakovými filtry, průmyslovým vysavačem a dalšími zařízeními (viz. schéma zauhlování v příloze). Odvodnění a kanalizace se napojí na stávající trasu.

Technický výkres hlubinné vykládky paliva viz. příloha.

## **5.2 Sklad paliva**

### **5.2.1 Popis konstrukce**

Jedná se o monolitickou železobetonovou konstrukci se svislými nosnými stěnami vetknutými do základové desky. Objekt je založen hlubinným způsobem.

Obvodové stěny (krabici) tvoří tuhá železobetonová konstrukce se základovou deskou a stropem na úrovni uložení horního dopravníku paliva. Hlavní úložný prostor se nachází uvnitř konstrukce. Výsypka je tvořena šikmými betonovými stěnami, na ni navazuje část se svislými obvodovými stěnami. Jako celek tvoří hlavní skladovací komoru.

Čedičový obklad chrání šikmou část železobetonové výsypky proti otěru.

### **5.2.2 Popis technologie provozu**

Hranice provozu tvoří pásový dopravník T.2, ze kterého je uhlí shrnovacím pluhem staženo na pásový dopravník F.2 a pokračuje dopravními cestami do zásobníku paliva. Odvodnění a kanalizace se napojí na stávající trasu.

Uhlí dopravované na pásovém dopravníku T.2 je jednostranným shazovacím pluhem shrnuto do svodky paliva a odtud na skluz k pásovému dopravníku F.2. Pásový dopravník F.2 má výkon  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$  a dopravuje uhlí pod strop skladu paliva. Uhlí dopadne na pásový dopravník S.1 o výkonu  $100 \text{ t.h}^{-1}$ , který je umístěn pod stropem a rozvádí uhlí po celé délce skladu paliva. S určitými rozestupy jsou nad dopravním pásem S.1 umístěny dvoustranné shazovací pluhy, které po aktivaci zajistí shození paliva do patřičného místa zásobníku (vždy shazuje pouze jeden pluh). Vyprazdňování zásobníku je zespodu pomocí vyhrnovacího vozu VV.1 o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Vyhrnuté uhlí dopadne na pásový dopravník S.2 o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Odtud je palivo shozeno do násypky na pásový dopravník S.4 o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$  (tento dopravní pás má oboustranný chod – havarijní vyprázdnění zásobníku např. při zahoření paliva). V případě zauhlování je palivo dopravováno na pásový dopravník F.3 o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Odtud je uhlí svedeno na stávající dopravní pás T.2. Protipožární opatření (čidla CO, teploměry, vypuštění dusíku

v případě zahoření uhlí). Jestliže by došlo k potřebě vyprázdnění (zahoření paliva) se volí opačný chod pásového dopravníku S.4. Palivo se dopraví na násypku, která je zaústěna na pásový dopravník S.5 o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Uhlí je dopraveno na volnou plochu nevyužitě skládky paliva a zde se provedou patřičná opatření. Výše uvedený popis je pro první etapu. Rozdělení na dvě etapy je z důvodu nedostatku místa při stavbě (je potřeba volné plochy pro manipulaci s materiálem, atd.)

V druhé etapě se dostaví zbytek skladu paliva. Stávající pásový dopravník S.1 se prodlouží na potřebnou délku. Výkon dopravníku zůstane stejný, jen přibudou dvoustranné shrnovací pluhy. Uhlí bude opět vybíráno vyhrnovacím vozem VV.2 zespodu zásobníku paliva o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Vyhrnuté uhlí dopadne na pásový dopravník S.3 o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Odtud je palivo shozeno do násypky na pásový dopravník S.4 o výkonu  $80 - 100 \text{ t.h}^{-1}$ . Déle je postup zauhlování stejný jako v předchozím popsáném případě viz. výše.

K omezení prašnosti je po celé délce vyhrnovací spára skladu paliva osazena gumovou clonou, ta je automaticky přizvednuta vozíkem vyhrnovacího vozu v místě jeho činnosti. Uchycení gumové clony je na stěně šikmé stěny skladu paliva.

Dopravní cesty a přesypy vybaveny mlžícím zařízením (tlakový vzduch + voda), které slouží k omezení prašnosti. Samotný sklad paliva je vybaven sektorovými rozvody vody pro případ uhašení hořícího paliva.

Pásové dopravníky vybaveny dopadovým (podpěrovým) ložem, aby zajistili spolehlivé utěsnění přesypů. Násypky jsou utěsněny bočním dvojitém těsněním. Svodky přesypů částečně vyloženy otěruvzdorným materiálem v místě kontaktu s uhlím, mají dobré kluzné vlastnosti (omezení nálepů).

Zařízení je zcela automatizované s možností přepnutí do ručního provozu. Kamerový systém zajišťuje trvalý dozor nad provozem a obsluha provádí pochůzky v daných intervalech. Světelná a zvuková signalizace varuje před spuštěním linky. Rotující části vybaveny ochrannými kryty. Bezpečnostní vypínače umístěny u příslušné technologie. Snímače nestandardních podmínek (otáčky, vybočení pásu, zahlcení přesypu) hlídají provoz celého systému. Dále je sklad paliva vybavena protiexplozivním systémem,



podtlakovými filtry, průmyslovým vysavačem a dalšími zařízeními (viz. technologické schéma zauhlování v příloze). Odvodnění a kanalizace se napojí na stávající trasu.

### 5.2.3 Kapacita provozu

V letních měsících je potřeba zásob paliva nižší. V zimních měsících je naopak vhodné mít plný sklad paliva pro dostatečné zásobení kotlů. Pokud teplota klesne pod  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pohybuje se spotřeba uhlí cca  $1200\text{ t.den}^{-1}$ . Celková roční spotřeba hnědého uhlí je cca  $200\,000\text{ t.rok}^{-1}$ . Stávající skládka hnědého uhlí má kapacitu  $10\,000\text{ t}$ . Sklad paliva je navržen na tuto hodnotu. Údaje o hnědém uhlí jsou uvedeny v tabulce 15. viz výše.

Hlubinná vykládka, stávající dopravní pás a sklad paliva jsou o dopravním výkonu  $80 - 100\text{ t.h}^{-1}$ . V následující tabulce uvedu hodnoty pro nové zauhlování např. čas vyhrnutí jednoho železničního vozu z násypky paliva, doba potřebná pro zauhlení celého skladu paliva (od prázdného stavu) a dobu, po kterou bude schopna Teplárna Zlín provozovat kotle při 100% jmenovitém výkonu za předpokladu, že bude k dispozici pouze uhlí ve skladu paliva.

význam	hodnota přibližná	jednotka
dopravní výkon celého zauhlování	80 – 100	$[\text{t.h}^{-1}]$
hmotnost uhlí v železničním vozu	55	$[\text{t}]$
vyhrnutí jednoho železničního vozu	33	$[\text{min}]$
kapacita nového skladu paliva	10 000	$[\text{t}]$
zauhlení skladu paliva	4,2	$[\text{d}]$
provoz kotlů na max. výkon	1200	$[\text{t.d}^{-1}]$
zásoba paliva (při max. výkonu kotlů)	8,3	$[\text{d}]$

*Tab. 16. Nové zauhlování v číslech*

Technický výkres skladu paliva viz. příloha.

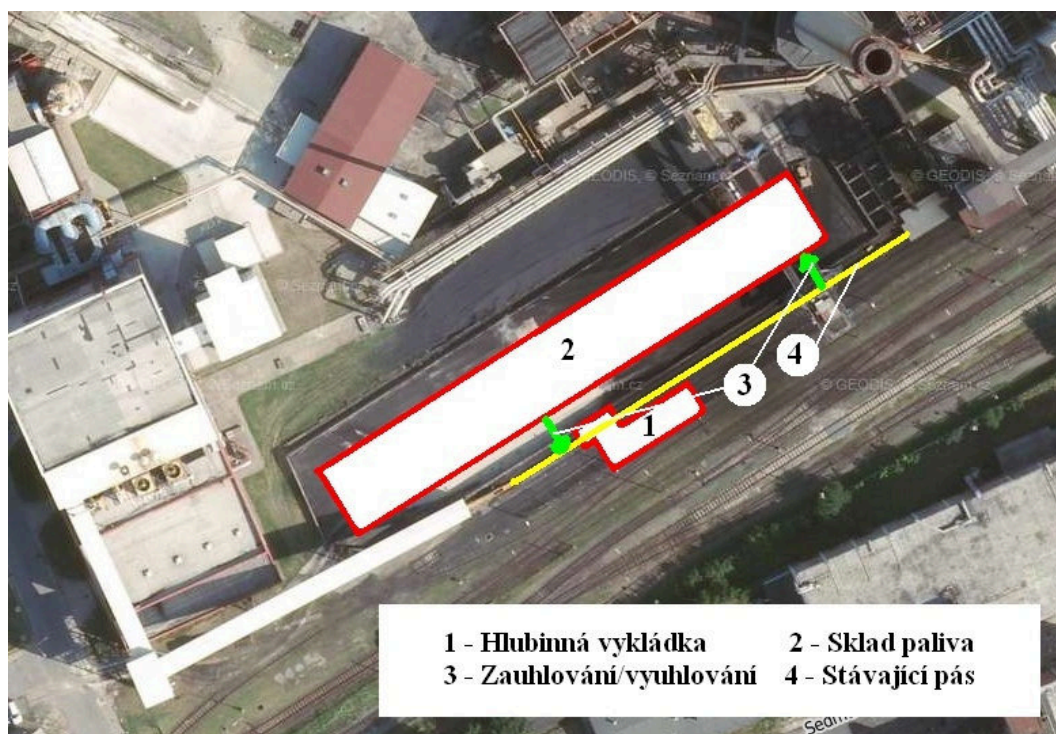
### 5.3 Realizace celé přestavby

Jediná možnost, kdy lze provést přestavbu zauhlování je v letních měsících. Po tuto dobu je provoz Teplárny Zlín omezen. Probíhá údržba kotlů (jeden provozují a druhý se opravuje, cca odstávka jednoho kotle jeden měsíc).

Hlavní skládka paliva se vyprázdní (kapacita 10 000 t). Vedlejší skládka, která je určena pro černé uhlí se využije po dobu přestavby jako zásoba paliva pro kotle (kapacita 3000 t). Uhlí bude dovážet v nákladních automobilech Teplárna Otrokovice. Zauhlování kotlů se provede zavážecím bagrem, který si Teplárna Zlín vypůjčí od stavební firmy. Stávající pásový dopravník T.2 bude sloužit pro zauhlování před i po rekonstrukci.

První etapa stavby je realizace hlubinné vykládky paliva a části skladu paliva. Po dokončení se opět obnoví železniční doprava uhlí a najede se nová technologie. Dočasná skládka paliva se vyprázdní a použije jako prostor k uložení stavebního materiálu atd. .

Druhá etapa je dokončení skladu paliva respektive rozšíření na požadovanou kapacitu. Po dokončení celé stavby je nové zauhlování plně připraveno k provozu. Pohled na nové zauhlování pro názornější představu na obrázku viz. níže.



Obr. 9. Pohled na nové zauhlování [10]

## **6. TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PŘÍNOSU REKONSTRUKCE**

### **6.1 Technické hledisko**

Před rekonstrukcí měla Teplárna Zlín veliké problémy se zahořením skladovaného hnědouhelného paliva a to především v letních měsících. Nepříjemný zápach způsobený nedokonalým spalováním uhlí obtěžoval zejména okolí teplárny. Při manipulaci s palivem (vykládka, zauhlování) docházelo ke zvýšené koncentraci prachových částic v okolí skládky paliva. Dřívější způsob manipulace s palivem měl negativní vliv na životní prostředí.

Po rekonstrukci se používá hlubinná vykládka a sklad paliva. Hlubinná vykládka paliva je opláštěná a vybavená potřebnými opatřeními (těsnící gumové lišty, průmyslový vysavač atd.) pro snížení prašnosti při vykládce paliva. Sklad paliva tvoří železobetonová konstrukce, která je kompletně uzavřená a opláštěná, tudíž eliminuje zvýšenou prašnost při manipulaci s palivem. V případě samovznícení paliva se použije dusíkové hospodářství nebo systém postřikové vody. Sklad paliva je vybaven havarijním odvodem uhlí mimo zauhlovací pás na volný prostor, kde se s ním patřičně naloží.

Z podmínek, které byly kladeny na úpravu zauhlování se podařilo odstranit všechny stávající problémy. Celkový dopad na životní prostředí je příznivější.

### **6.2 Ekonomické hledisko**

Pro stávající zauhlování bylo potřeba pět zaměstnanců. Nové zauhlování ušetří tři pracovní místa (dva čističi vagónů a obsluha jeřábu).

Celkové předpokládané investiční náklady na přestavbu odhaduji na cca 200 mil. Kč. Z tohoto čísla je zřejmé, že cena stavby se nezaplatí v době její životnosti.

V dnešní době je kladen veliký důraz na životní prostředí. Úprava zahřívání v Teplárně Zlín, přispěje k jejímu zlepšení, avšak z ekonomického hlediska je výstavba nerentabilní.

## 5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce je návrh úpravy zauhlování pro snížení prašnosti a omezení samovznícení skládkového hnědouhelného paliva. Palivo se dnes běžně skladuje na podkladové vrstvě, nezastřešené a volně ložené. To má za následek občasné zahoření paliva, především v letních měsících. Místo iniciace zahoření se musí poté složitě zneškodňovat a přináší zbytečné starosti navíc.


Varianta, která splnila všechny požadavky na úpravu zauhlování je hlubinná vykládka a sklad paliva. Hlubinná vykládka umožňuje snížení prašnosti během samotného vyložení vagónu a dopravy paliva. Uhlí je vyprázdněno gravitačně, ale neurychluje zauhlování skladu, protože je omezeno dopravní kapacitou vyhrnovacího vozu a pásových dopravníků. Sklad paliva zajišťuje snížení prašnosti a především eliminuje zahoření paliva uvnitř skladu. Je zde celá řada čidel, které hlídají hodnoty např. CO a teplotu. Uhlí je možno ze skladu odvést na volnou plochu, jde o havarijní vyprázdnění zásobníku. Kapacita nového skladu je navrhována na cca 10 000 t. Výhodou je možnost přímého zauhlování z hlubinné vykládky na stávající dopravní pás.

V dnešní době musíme brát ohledy na životní prostředí. Při modernizaci nebo výstavbě nového vnějšího zauhlování bereme na vědomí, celkový dopad na životní prostředí a okolí.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Bohumír Čech za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Ostravě: 19. 5. 2014



.....

podpis autora

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Dlouhý T. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Skripta ČVUT Praha 2005
- [2] Ševelová, K. a spol. *Parní kotle* (Návody do cvičení). Ostrava: VŠB–TU Ostrava, 2007
- [3] Katalog hnědého uhlí – Severočeské doly
- [4] Katedra energetiky - archiv. VŠB – TU Ostrava
- [5] Materiály získané během studia na VŠB–TU Ostrava
- [6] Materiály poskytnuté Teplárnou Zlín
- [7] Materiály poskytnuté firmou Envirmine–Energo
- [8] Materiály získané během návštěvy Teplárny Kolín
- [9] <http://generation.alpiq.cz/> – blokové schéma Teplárny Zlín
- [10] <http://www.mapy.cz/> – pohled na nové zauhlování

## SEZNAM PŘÍLOH

- |  |                   |
|--|-------------------|
| Příloha č. 01: Technologické schéma nového zauhlování    | (počet listů: 1)  |
| Příloha č. 02: Technický výkres hlubinné vykládky paliva | (počet listů: 1)  |
| Příloha č. 03: Technický výkres skladu paliva            | (počet listů: 2)  |
| Příloha č. 04: Stávající zauhlování Teplárny Kolín       | (počet listů: 10) |

## SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

<i>Obr. 1. Schéma kotle K31 .....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 2. Schéma kotle K32 .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3. Blokové schéma teplárny .....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 4. Násypka na dopravní pás .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 5. Pohled na skládku z kotle K32 .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 6. Katastrální mapa Teplárny Zlín .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 7. Nomogram pro stanovení tepelné ztráty sdílením tepla do okolí .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 8. Nomogram pro stanovení tepelné ztráty sdílením tepla do okolí .....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 9. Pohled na nové zauhlování .....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 1. Prvkový rozbor HU .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 2. Hodnoty k výpočtu odsíření .....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 3. Vypočítané a stanovené hodnoty .....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 4. Střední měrné teplo při konstantním tlaku .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 5. Slučovací tepla reakcí .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6. Parametry kotle K31 .....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7. Vypočítané hodnoty kotle K31 .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 8. Hodnoty k výpočtu odsíření .....</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 9. Vypočítané a stanovené hodnoty .....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 10. Střední měrné teplo při konstantním tlaku .....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 11. Slučovací tepla reakcí .....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 12. Parametry kotle K32 .....</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 13. Vypočítané hodnoty kotle K32 .....</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 14. Tepelná bilance kotlů .....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 15. Vlastnosti hnědého uhlí – ořech 2 .....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 15. Nové zauhlování v číslech .....</i>	<i>77</i>